



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ZMĚNA PALIVOVÉ ZÁKLADNY UHELNÉHO KOTLE

CHANGING THE FUEL BASE OF THE COAL BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miloš Kallas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Miloš Kallas**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Změna palivové základny uhelného kotle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající parní kotel s granulačním ohništěm, s přirozenou cirkulací výparníkového okruhu, na spalování černého uhlí a se spoluspalováním koksárenského plynu a vysokopečního plynu navrhnete pro čistě plynový provoz s využitím stávajícího plynného paliva při dodržení parametrů páry a s případnou změnou jmenovitého parního výkonu kotle. Současné množství páry je 200 t/h, o parametrech 9,60 MPa, 525 °C.

Navrhnete úpravu výhřevných ploch kotle s ohledem na minimální investiční náročnost úprav a provedte tepelný přepočet kotle.

Pro provedení výpočtu obdržíte potřebné konstrukční údaje a popis kotle.

Cíle diplomové práce:

Stechiometrické výpočty současné směsi paliv a nového paliva.

Tepelný výpočet stávajícího kotle.

Návrhy úprav kotle pro nové palivo.

Vyhodnocení navrhovaných úprav.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

BASU, Pabir., Cen KEFA, Louis JESTIN: Boilers and Burners. Springer 1999, ISBN 0-387-98703-7

RAYAPROLU, Kumar: Boilers for Power and Process, CRC Press, 2009, ISBN 978-1-4200-7536-6

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá změnou palivové základny uhelného kotle z důvodu snížení emisí CO₂ a jeho tepelným přepočtem. V úvodní části je proveden výpočet spalovací komory. Poté následuje přepočet teplosměnných ploch. Je kladen důraz na zachování stávajících parametrů páry.

Klíčová slova

Parní kotel, stechiometrické výpočty, tepelný výpočet, přehřívák, výparník, ekonomizér

ABSTRACT

This thesis deals with the change of the fuel base of a coal boiler due to the reduction of CO₂ emissions and its thermal recalculation. In the first part, there is implemented calculation of the combusting chamber. This is followed by the recalculation of the heat transfer surfaces. The emphasis is placed on the preservation of the existing steam parameters.

Key words

Steam boiler, stoichiometry, thermal calculation, superheater, evaporator, economizer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KALLAS, Miloš. *Změna palivové základny uhelného kotle* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124382>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Změna palivové základny uhelného kotle* vypracoval samostatně s využitím odborných konzultací a použitím odborné uvedené literatury.

V Brně 26. 6. 2020

Datum

Bc. Miloš Kallas

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto velmi poděkovat svému konzultantovi panu Ing. Jaroslavu Studníčkovi ze společnosti PROVYKO za poskytnutí cenných rad a podkladů, za jeho ochotu čas, který mi věnoval a také za výbornou komunikaci v době pandemie. Dále bych chtěl také poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady během psaní diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 Složení směsi paliv	16
2 Stechiometrické výpočty	17
2.1 Objemy vzduchu a spalin.....	17
2.1.1 Minimální množství jednotlivých složek vlhkých spalin.....	17
2.1.2 Minimální množství spalin.....	18
2.2 Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy vzduchu a spalin.....	18
2.2.1 Skutečné množství vzduchu a spalin.....	18
2.2.2 Objemové části tříatomových plynů	19
2.3 Entalpie vzduchu a spalin	19
3 Tepelná bilance kotle.....	22
3.1 Teplo přivedené do kotle	22
3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	22
3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách	22
3.2.2 Ztráta sdílením tepla do okolí	22
3.2.3 Ztráta citelným teplem spalin.....	22
3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva.....	23
4 Výpočet spalovací komory	24
4.1 Rozměry spalovací komory	24
4.2 Tepelný výpočet ohniště	24
4.2.1 Teplota spalin na výstupu z ohniště	25
4.2.2 Součinitel M	25
4.2.3 Boltzmanovo číslo.....	25
4.2.4 Stupeň černosti ohniště.....	27
5 Bilanční výpočet teplosměnných ploch ze strany média.....	29
5.1 Tlakové ztráty	29
5.2 Výkony jednotlivých teplosměnných ploch	29
5.2.1 Přehřívák P4	29
5.2.2 Přehřívák P3	29
5.2.3 Deskový přehřívák	30
5.2.4 Přehřívák P1	31
5.2.5 Výparník.....	32
5.2.6 Ohřívák vody (ekonomizér)	32
5.3 Součet tepelných výkonů všech ploch	32
6 Pilový diagram.....	34
7 Oblast deskového přehříváku	35
7.1 Bilanční teplo spalin	35
7.2 Deskový přehřívák P2.....	37
7.2.1 Střední součinitel prostupu tepla	37
7.2.2 Výhřevná plocha	41
7.2.3 Střední logaritmický teplotní spád	42

7.2.4	Teplo pohlcené deskovým přehřívákem	42
7.3	Membránová stěna (část výparníku)	42
7.3.1	Součinitel prostupu tepla	42
7.3.2	Výhřevná plocha	43
7.3.3	Střední logaritmický teplotní spád	43
7.3.4	Teplo pohlcené výparníkem	44
7.4	Stropní přehřívák (součást P1)	44
7.4.1	Součinitel prostupu tepla	44
7.4.2	Výhřevná plocha	46
7.4.3	Střední logaritmický teplotní spád	46
7.4.4	Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti DP	46
7.5	Celková tepelná bilance oblasti DP	46
8	Oblast mříže 1	48
8.1	Bilanční teplo spalin	48
8.2	Mříž 1	49
8.2.1	Součinitel prostupu tepla	49
8.2.2	Výhřevná plocha	51
8.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	51
8.2.4	Teplo pohlcené mříží 1	51
8.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 1	51
9	Oblast přehříváku 4	52
9.1	Bilanční teplo spalin	52
9.2	Přehřívák 4	53
9.2.1	Součinitel prostupu tepla	54
9.2.2	Výhřevná plocha	57
9.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	57
9.2.4	Teplo pohlcené přehřívákem 4	57
9.3	Membránová stěna (část výparníku)	57
9.3.1	Součinitel prostupu tepla	57
9.3.2	Výhřevná plocha	59
9.3.3	Střední logaritmický teplotní spád	59
9.3.4	Teplo pohlcené výparníkem	59
9.4	Stropní přehřívák (součást P1)	59
9.4.1	Součinitel prostupu tepla	59
9.4.2	Výhřevná plocha	61
9.4.3	Střední logaritmický teplotní spád	62
9.4.4	Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti P4	62
9.5	Boční stěny (součást P1)	62
9.5.1	Součinitel prostupu tepla	62
9.5.2	Výhřevná plocha	64
9.5.3	Střední logaritmický teplotní spád	64
9.5.4	Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti P4	65
9.6	Celková tepelná bilance oblasti P4	65

10	Oblast přehříváku 3	66
10.1	Bilanční teplo spalin	67
10.2	Přehřívák 3	68
10.2.1	Součinitel prostupu tepla	68
10.2.2	Výhřevná plocha	71
10.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	71
10.2.4	Teplo pohlcené přehřívákem 3	71
10.3	Membránová stěna (část výparníku)	72
10.3.1	Součinitel prostupu tepla	72
10.3.2	Výhřevná plocha	73
10.3.3	Střední logaritmický teplotní spád	73
10.3.4	Teplo pohlcené výparníkem	73
10.4	Stropní přehřívák (součást P1)	74
10.4.1	Součinitel prostupu tepla	74
10.4.2	Výhřevná plocha	76
10.4.3	Střední logaritmický teplotní spád	76
10.4.4	Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti P3	76
10.5	Boční stěny (součást P1)	76
10.5.1	Součinitel prostupu tepla	77
10.5.2	Výhřevná plocha	78
10.5.3	Střední logaritmický teplotní spád	79
10.5.4	Teplo pohlcené stropními bočními stěnami v oblasti P3	79
10.6	Celková tepelná bilance oblasti P3	79
11	Oblast mříže 2	80
11.1	Bilanční teplo spalin	80
11.2	Mříž 2	81
11.2.1	Součinitel prostupu tepla	81
11.2.2	Výhřevná plocha	83
11.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	83
11.2.4	Teplo pohlcené mříží 2	83
11.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 2	83
12	Oblast mříže 3	84
12.1	Bilanční teplo spalin	84
12.2	Mříž 3 (součást P1)	85
12.2.1	Součinitel prostupu tepla	85
12.2.2	Výhřevná plocha	88
12.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	88
12.2.4	Teplo pohlcené mříží 3	88
12.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 3	88
13	Obratová komora 1	89
13.1	Bilanční teplo spalin	89
13.2	Stropní přehřívák (součást P1)	90
13.2.1	Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti OK1	90

13.3	Boční stěny (součást P1)	91
13.3.1	Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti OK1	92
13.4	Celková tepelná bilance oblasti OK1	92
14	Oblast mříže 5	93
14.1	Bilanční teplo spalín	93
14.2	Mříž 5 (součást P1)	94
14.2.1	Součinitel prostupu tepla	94
14.2.2	Výhřevná plocha	97
14.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	97
14.2.4	Teplo pohlcené mříží 5	97
14.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 5	97
15	Oblast mříže 4	98
15.1	Bilanční teplo spalín	98
15.2	Mříž 4 (součást P1)	99
15.2.1	Součinitel prostupu tepla	99
15.2.2	Výhřevná plocha	102
15.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	102
15.2.4	Teplo pohlcené mříží 5	102
15.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 5	102
16	Obratová komora 2	103
16.1	Bilanční teplo spalín	103
16.2	Stropní přehřívák a zadní stěna (součást P1)	104
16.2.1	Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti OK2	104
16.3	Boční stěny (součást P1)	105
16.3.1	Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti OK2	106
16.4	Celková tepelná bilance oblasti OK2	106
17	Oblast mříže 6	108
17.1	Bilanční teplo spalín	108
17.2	Mříž 6 (součást P1)	109
17.2.1	Součinitel prostupu tepla	109
17.2.2	Výhřevná plocha	112
17.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	112
17.2.4	Teplo pohlcené mříží 6	112
17.3	Celková tepelná bilance oblasti mříže 6	112
18	Oblast EKO 2	113
18.1	Bilanční teplo spalín	113
18.2	Levá část EKO 2	114
18.2.1	Součinitel prostupu tepla	115
18.2.2	Výhřevná plocha	117
18.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	118
18.2.4	Teplo pohlcené levou částí EKA 2	118
18.3	Pravá část EKO 2	118

18.3.1	Součinitel prostupu tepla	119
18.3.2	Výhřevná plocha.....	120
18.3.3	Střední logaritmický teplotní spád	120
18.3.4	Teplo pohlcené pravou částí EKA 2.....	121
18.4	Celková tepelná bilance oblasti EKO 2	121
19	Oblast EKO 1	122
19.1	Bilanční teplo spalin	122
19.2	Levá část EKO 1	123
19.2.1	Součinitel prostupu tepla	124
19.2.2	Výhřevná plocha.....	125
19.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	125
19.2.4	Teplo pohlcené levou částí EKA 1	126
19.3	Pravá část EKO 1	126
19.3.1	Součinitel prostupu tepla	127
19.3.2	Výhřevná plocha.....	127
19.3.3	Střední logaritmický teplotní spád	128
19.3.4	Teplo pohlcené pravou částí EKA 1	128
19.4	Celková tepelná bilance oblasti EKO 1	128
20	Oblast OVZ 2	129
20.1	Bilanční teplo spalin	129
20.2	Levá část OVZ 2	130
20.2.1	Součinitel prostupu tepla	131
20.2.2	Teplotní spád	133
20.2.3	Výhřevná plocha.....	134
20.2.4	Teplo pohlcené levou částí OVZ 2.....	134
20.3	Pravá část OVZ 2	134
20.3.1	Součinitel prostupu tepla	135
20.3.2	Teplotní spád	137
20.3.3	Výhřevná plocha.....	137
20.3.4	Teplo pohlcené pravou částí OVZ 2.....	137
20.4	Celková tepelná bilance oblasti OVZ 2	137
21	Oblast OVZ 1	138
21.1	Bilanční teplo spalin	138
21.2	Levá část OVZ 1	139
21.2.1	Součinitel prostupu tepla	140
21.2.2	Teplotní spád	142
21.2.3	Výhřevná plocha.....	143
21.2.4	Teplo pohlcené levou částí OVZ 1	143
21.3	Pravá část OVZ 1	143
21.3.1	Součinitel prostupu tepla	144
21.3.2	Teplotní spád	145
21.3.3	Výhřevná plocha.....	146
21.3.4	Teplo pohlcené pravou částí OVZ 1.....	146
21.4	Celková tepelná bilance oblasti OVZ 1	146

22 Celková bilance kotle	147
ZÁVĚR	148
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	149
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	150
SEZNAM PŘÍLOH.....	153

ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz na ekologii, především na zamezení dopadu klimatických změn. Energetika svou činností přispívá ke znečišťování životního prostředí a je považována za jednoho z největších znečišťovatelů. Státy Evropské unie, včetně České republiky, se zavázali v rámci Pařížské dohody, snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů o 40 % v porovnání s rokem 1990. Mnoho zemí v této souvislosti začíná ustupovat od uhelné energie a hledá možné náhrady tohoto fosilního zdroje paliva. V České republice dominuje výroba energie především z uhlí. Z tohoto hlediska není pro naši vůbec jednoduché odpoutat se od našeho primárního zdroje energie. Přesto však existuje mnoho alternativ, které by v budoucnosti mohly být možnou náhradou uhlí. [5]

Hlavním cílem diplomové práce je přepočít stávajícího uhelného kotle na čistě plyný provoz z důvodu snížení emisí CO_2 . Změnou palivové základny lze docílit snížení emisí CO_2 a přitom zachovat stávající kotel, což je ekonomicky výhodnější než pořizovat nový kotel přímo navržený na spalování plynu, či jiného nízkoemisního zdroje.

Parní kotel slouží pro teplárnu v Ostravě. Kotel je řešený jako dvoutahový s granulačním ohništěm. Byl navržený pro spalování černého uhlí se spoluspalováním vysokopecního a koksárenského plynu o parním výkonu 200 t/h, 9,6 Mpa a 525°C. Hlavním požadavkem je zachování parametrů páry, s případným mírným poklesem parního výkonu. Změna palivové základny přináší několik úprav. Hlavní úpravy jsou provedeny v oblasti ohniště. Ke dvěma stávajícím plynovým hořákům přibyly další 4, které byly vhodně rozmístěny v přední a zadní stěně. Výsypka byla ponechána a její výstupní otvor je zadělaný.

Před samotným výpočtem je nutné určit parametry nové směsi paliv včetně výhřevnosti. Dále se určí stechiometrické výpočty, ze kterých se zjistí množství vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a objem spalin. V následujících kapitolách je dále proveden tepelný výpočet jednotlivých teplosměnných ploch. Na závěr bude provedena celková kontrola tepelné bilance.

Při všech výpočtech, pokud není uvedeno jinak, se postupuje podle rovnic, doporučení, hodnot a označení z [1] a [2]. Samotný výpočet je realizován pomocí [3] s využitím [4]

1 Složení směsi paliv

Kotel bude navržen na spoluspalování koksárenského a vysokopecního plynu. Jednotlivé hmotnostní toky plynů jsou voleny na základě odborné konzultace. Výsledné parametry směsi těchto plynů jsou určeny především na základě dodávaného množství jednotlivých plynů a také z jejich výhřevností a objemového složení jednotlivých složek.

Tab. 1.1 Parametry spalovaných plynů

Parametry	Koksárenský		Vysokopecní	
Hmotnostní tok	33000	Nm ³ /h	36000	Nm ³ /h
Výhřevnost	17 530	KJ/Nm ³	3 070	KJ/Nm ³
H ₂	55,4	%obj.	3,9	% obj.
CH ₄	25	% obj.	0	% obj.
C ₂ H ₆	3	% obj.	0	% obj.
CO	5,5	% obj.	21	% obj.
CO ₂	2,5	% obj.	19,8	% obj.
N ₂	8	% obj.	55,3	% obj.
O ₂	0,6	% obj.	0	% obj.

Tab. 1.2 Parametry směsi plynů

Parametry	Směs	
Hmotnostní tok	69000	Nm ³ /h
Výhřevnost	9985,652	KJ/Nm ³
H ₂	28,53	% obj.
CH ₄	11,957	% obj.
C ₂ H ₆	1,435	% obj.
CO	13,587	% obj.
CO ₂	11,526	% obj.
N ₂	32,678	% obj.
O ₂	0,287	% obj.

2 Stechiometrické výpočty

Účelem stochiometrických výpočtů je stanovení potřebného objemu vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva a objemu spalin, které se uvolňují při spalování. Jednotkovým množstvím plyných paliv je 1 Nm^3 , což je normální metr krychlový pro $T_n = 273,15 \text{ K}$, $p_2 = 101,325 \text{ kPa}$.

2.1 Objemy vzduchu a spalin

Minimální množství kyslíku potřebného k dokonalému spálení 1 m^3 paliva

$$O_{O_2 \min} = 0,5 \cdot \frac{CO + H_2}{100} + 1,5 \cdot \frac{H_2S}{100} + \sum \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{C_x \cdot H_y}{100} - \frac{O_2}{100} \quad (2.1.1)$$

$$O_{O_2 \min} = 0,5 \cdot \frac{13,587 + 28,53}{2} + 1,5 \cdot 0 + \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{11,957}{100} + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{1,435}{100} - \frac{0,287}{100}$$

$$O_{O_2 \min} = 0,497 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Minimální množství suchého vzduchu potřebného k dokonalému spálení 1 m^3 paliva

$$O_{VZ \min}^S = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} = \frac{0,497}{0,21} = 2,367 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.1.2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu potřebného k dokonalému spálení 1 m^3 paliva

$$O_{VZ \min}^V = f_v \cdot O_{VZ \min}^S = 1,03 \cdot 2,367 = 2,438 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.1.3)$$

- při relativní vlhkosti $\varphi = 70 \%$ a teplotě vzduchu 30 °C je součinitel $f_v = 1,03$ [2]

Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$O_{H_2O}^V = (f_v - 1) \cdot O_{VZ \min}^S = (1,03 - 1) \cdot 2,367 = 0,071 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.1.4)$$

2.1.1 Minimální množství jednotlivých složek vlhkých spalin

Objem CO_2 ve spalinách

$$O_{CO_2 \min} = 0,01 \cdot \left(CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 0,03 \cdot O_{VZ \min}^S \right) \quad (2.1.5)$$

$$O_{CO_2 \min} = 0,01 \cdot (13,587 + 11,526 + 1 \cdot 11,957 + 2 \cdot 1,435 + 0,03 \cdot 2,367)$$

$$O_{CO_2 \min} = 0,4001 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Objem N_2 ve spalinách

$$O_{N_2 \min} = 0,01 \cdot \left(N_2 + 78,05 \cdot O_{VZ \min}^S \right) \quad (2.1.6)$$

$$O_{N_2 \min} = 0,01 \cdot (32,678 + 78,05 \cdot 2,367) = 2,174 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Objem Ar ve spalínách

$$O_{Ar \min} = 0,0092 \cdot O_{VZ \min}^S = 0,0092 \cdot 2,367 = 0,022 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.1.7)$$

Objem H₂O ve spalínách

$$O_{H_2O \min} = 0,01 \cdot \left(\sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + H_2 + H_2 S \right) + O_{H_2O}^V \quad (2.1.8)$$

$$O_{H_2O \min} = 0,01 \cdot \left(\frac{4}{2} \cdot 11,957 + \frac{6}{2} \cdot 1,435 + 28,53 + 0 \right) + 0,071$$

$$O_{H_2O \min} = 0,638 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

2.1.2 Minimální množství spalin

Minimální množství suchých spalin

$$O_{SS \min} = O_{CO_2 \min} + O_{SO_2 \min} + O_{N_2 \min} + O_{Ar \min} \quad (2.1.9)$$

$$O_{SS \min} = 0,4001 + 0 + 2,174 + 0,022 = 2,596 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SP \min} = O_{H_2O \min} + O_{SS \min} = 0,638 + 2,596 = 3,235 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.1.10)$$

2.2 Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy vzduchu a spalin

Při spalování paliva s obsahem vzduchu v ideálním stechiometrickém poměru ($\alpha = 1$), by nedocházelo k dokonalému promíchání vzduchu s palivem. Z tohoto důvodu se v praxi spaluje s přebytkem vzduchu α , který se volí dle zkušeností a doporučených tabulkových hodnot. Součinitel vzduchu má také zásadní vliv na tvorbu emisí NO_x. [2] Dle odborné konzultace je přebytek volen $\alpha = 1,1$.

2.2.1 Skutečné množství vzduchu a spalin

Skutečné množství vzduchu

$$O_{VZ} = \beta \cdot O_{VZ \min}^V = 1,1 \cdot 2,438 = 2,682 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (2.2.1)$$

Součinitel β určuje přísávání falešného vzduchu po trase spalin. V našem případě nebudeme uvažovat žádné přísávání, tedy $\beta = \alpha = 1,1$.

Skutečné množství spalin

$$O_{SP} = O_{SP \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^V = 3,235 + (1,1 - 1) \cdot 2,438 \quad (2.2.2)$$

$$O_{SP} = 3,478 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

2.2.2 Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0 + 0,4001}{3,478} = 0,115 \quad (2.2.3)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0,646}{3,478} = 0,186 \quad (2.2.4)$$

kde

$$O_{H_2O} = O_{H_2O \min} + (f_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^S \quad (2.2.5)$$

$$O_{H_2O} = 0,638 + (1,03 - 1) \cdot (1,1 - 1) \cdot 2,367 = 0,646 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Součet tříatomových částí plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,115 + 0,186 = 0,301 \quad (2.2.6)$$

2.3 Entalpie vzduchu a spalin

Při návrhu kotle, resp. jeho tepelné bilance, je potřebné vyjádřit teplo, které se odebírání spalinám. Pro zjednodušení je vhodné pracovat s entalpií spalin.[2] Entalpie spalin, které vzniknou spálením 1 Nm³ plynu s daným přebytkem vzduchu se určí z rovnice:

$$I_{SP} = I_{SP \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ \min} \quad (2.3.1)$$

Entalpie spalin při $\alpha = 1$ se určí ze vztahu:

$$I_{SP \min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (2.3.2)$$

- příslušné hodnoty i se dosadí z tabulky 2.1.

Tab. 2.1 Entalpie jednotlivých složek spalín [1]

t	CO_2	SO_2	N_2	Ar	H_2O	c vzduch
$[^{\circ}C]$	Entalpie složek spalín i $[kJ/Nm^3]$					$[kJ/m^3K]$
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	1,345
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	1,352
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	1,363
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	1,376
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	1,390
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	1,404
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	1,420
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1,434
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1,449
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1,461
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1,474
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1,486
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1,497
1400	3239	3323	2009	1300	2559	1,508
1500	3503	3587	2166	1393	2779	1,517
1600	3769	3838	2325	1577	3002	1,527
1800	4305	4363	2643	1742	3458	1,543
2000	4844	4890	2965	1857	3925	1,559
2500	6204	6205	3778	2321	5132	1,591

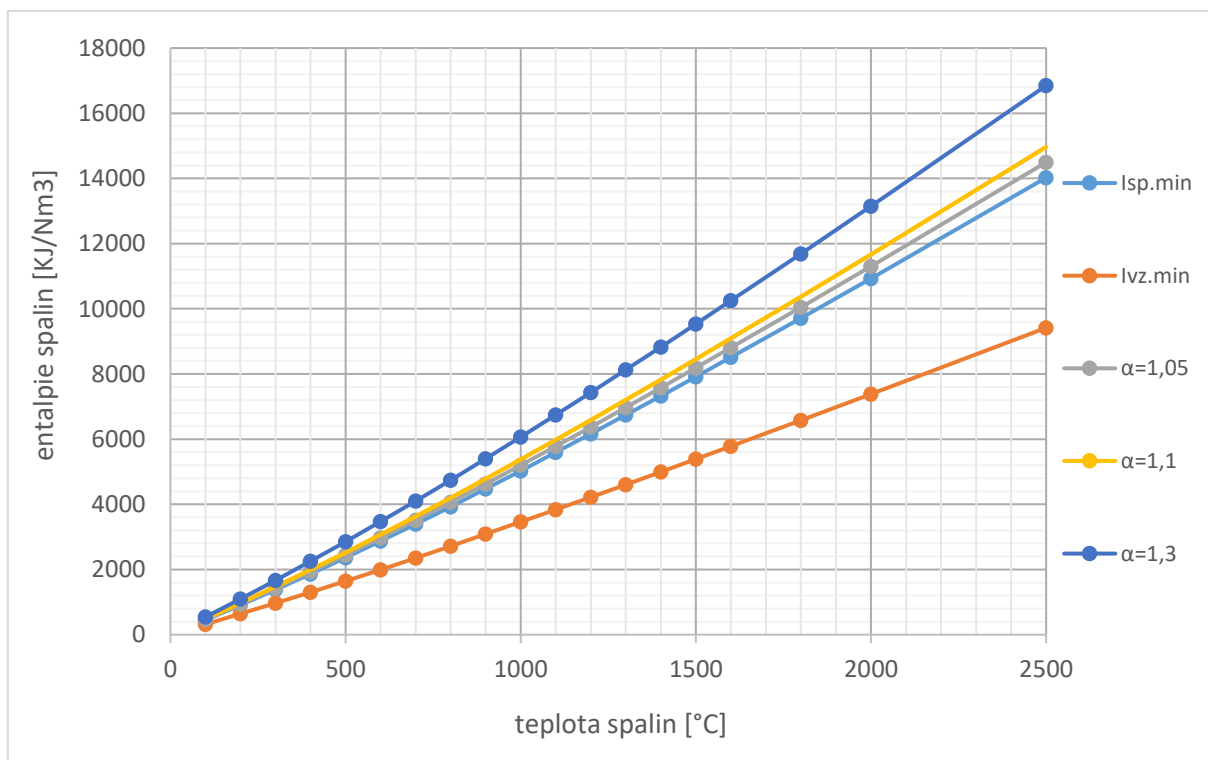
Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{VZ \min} = O_{VZ \min}^S \cdot (c \cdot t)_{VZ} \quad (2.3.3)$$

Výsledné hodnoty entalpií vzduchu a spalín s danými přebytky vzduchu jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tab. 2.2 Entalpie vzduchu a spalin v závislosti na teplotě

t [°C]	$I_{SP\ min}$ [kJ/Nm ³]	$I_{VZ\ min}$ [kJ/Nm ³]	$I_{SP} = I_{SP\ min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ\ min}$ [kJ/Nm ³]		
			$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,3$
100	447,760	318,339	463,677	479,594	543,262
200	906,583	640,233	938,594	970,606	1098,653
300	1377,647	967,874	1426,041	1474,434	1668,009
400	1861,717	1302,510	1926,843	1991,968	2252,470
500	2358,933	1645,589	2441,212	2523,492	2852,610
600	2869,543	1994,229	2969,254	3068,966	3467,811
700	3392,357	2352,740	3509,994	3627,631	4098,179
800	3927,145	2716,119	4062,951	4198,757	4741,981
900	4471,721	3085,966	4626,019	4780,317	5397,511
1000	5028,248	3459,162	5201,206	5374,164	6065,997
1100	5591,727	3837,119	5783,583	5975,439	6742,863
1200	6163,995	4220,901	6375,040	6586,085	7430,266
1300	6742,409	4605,710	6972,694	7202,980	8124,122
1400	7326,112	4995,705	7575,897	7825,682	8824,823
1500	7915,582	5387,144	8184,939	8454,296	9531,725
1600	8514,097	5782,971	8803,246	9092,394	10248,989
1800	9714,693	6573,343	10043,360	10372,028	11686,696
2000	10931,121	7378,291	11300,036	11668,950	13144,608
2500	14023,649	9416,283	14494,463	14965,277	16848,534



Obr. 2.1 I-t diagram spalin

3 Tepelná bilance kotle

Tepelná bilance kotle slouží ke stanovení účinnosti kotle. Spalováním se transformuje energie uložená v palivu do pracovního média (voda nebo pára). Tato transformace energie z hlediska druhého termodynamického zákona nikdy neprobíhá dokonale a dochází při ní k určitým energetickým ztrátám. Pomocí těchto ztrát je možné určit celkovou tepelnou účinnost kotle η_k . [2]

3.1 Teplo přivedené do kotle

Palivo není předehříváno cizím zdrojem a neobsahuje vodu, tudíž neuvažujeme fyzické teplo paliva $i_p = 0$. Spalovací vzduch rovněž není ohříván Q_{VZV} . Teplo přivedené do kotle na 1 Nm³ plynného paliva je rovno:

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{VZV} = 9\,985,65 + 0 + 0 = 9985,65 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (3.1.1)$$

3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelné ztráty kotle snižují jeho účinnost. Jelikož palivem je směs plynů, tak nevznikají ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal) a ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků. [2]

Pro výpočet účinnosti budeme uvažovat pouze ztráty hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal), ztráty sdílením tepla do okolí a ztráty citelným teplem spalin (komínová ztráta).

3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalínách

Její hodnota je stanovena na základě emisního limitu $CO = 50 \text{ mg/Nm}^3$ a obsahu kyslíku pro referenční stav spalin $O_{2ref} = 3 \%$.

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_p^p} = \frac{0,2116 \cdot 50 \cdot 2,596}{(21 - 3) \cdot 9985,65} = 0,015 \% \quad (3.2.1)$$

3.2.2 Ztráta sdílením tepla do okolí

Je závislá na parním výkonu kotle, druhu nátěru a oplechování. V našem případě uvažujeme hliníkový nátěr, oplechování a parní výkon $M_{pp} = 55,5 \text{ kg/s}$.

$$Z_{SO} = 0,5 \%$$

3.2.3 Ztráta citelným teplem spalin

Komínová ztráta má nejvyšší hodnotu, a tudíž má největší vliv na účinnost kotle. Představuje nevyužité teplo, které odchází ve spalínách do komínu. [2]

Výstupní teplota spalin je $t_k = 150^\circ\text{C}$, teplota okolního vzduchu $t_{ok} = 25^\circ\text{C}$ a součinitel přebytku vzduchu za kotlem $\alpha_k = 1,3$.

$$Z_K = \frac{O_{SP} \cdot c_{SP} \cdot (t_k - t_{ko})}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{3,478 \cdot 1,53 \cdot (150 - 25)}{9985,652} \cdot 100 = 6,451 \% \quad (3.2.2)$$

Měrné teplo spalin

$$C_{SP} = \frac{I_{SP}}{O_{SP} \cdot t_k} = \frac{796,993}{3,478 \cdot 150} = 1,53 \text{ kJ/Nm}^3 \cdot K \quad (3.2.3)$$

I_{SP} je entalpie spalin při teplotě $t_k = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ a součiniteli přebytku vzduchu za kotlem $\alpha_k = 1,3$. Její hodnota byla určena interpolací z tabulky 2.2.

Tepelná účinnost kotle

$$\eta_K = 100 - \sum Z = 100 - Z_{CO} - Z_{SO} - Z_K \quad (3.2.4)$$

$$\eta_K = 100 - \sum Z = 100 - 0,015 - 0,5 - 6,651 = 92,834 \%$$

3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

Výrobní teplo páry

V kotli se nenachází mezipřehřívák páry $M_{MP} = 0$, ani nedochází k odběru páry $M_{OP} = 0$. Pro zjednodušení nebudeme uvažovat množství odluhu $M_O = 0$.

$$Q_V = M_{PP} \cdot (i_{PP} - i_{NV}) + M_{MP} \cdot (\Delta i) + M_O \cdot (\Delta i) + M_{OP} \cdot (\Delta i) \quad (3.3.1)$$

$$Q_V = 55,56 \cdot (3443,429 - 639,885) = 155,75 \text{ MW}$$

i_{PP} – entalpie přehřáté páry při 9,6 Mpa; 525 °C

i_{NV} – entalpie napájecí vody při 12,7 Mpa; 150 °C

Množství paliva

Množství paliva přivedeného do kotle M_{Pal} se rovná množství skutečně spáleného paliva M_{PV} , jelikož při spalování plyných paliv nevznikají ztráty mechanickým nedopalem.

$$M_{Pal} = M_{PV} = \frac{Q_V}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_K}{100}} = \frac{155\,752}{9958,652 \cdot \frac{92,834}{100}} = 16,802 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3.2)$$

4 Výpočet spalovací komory

4.1 Rozměry spalovací komory

Z důvodu požadavku na minimální investiční náklady jsou rozměry spalovací komory ponechány, a to i včetně výsypky na spodku ohniště, která v důsledku změny paliva nebude dále potřebná. Rozměry spalovací komory jsou odečteny z výkresové dokumentace stávajícího kotle.

Aktivní objem ohniště

$$V_o = 759,983 \text{ m}^3 \quad (4.1.1)$$

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{16,802 \cdot 9985,652}{759,983} = 220,76 \text{ kW/m}^3 \quad (4.1.2)$$

Povrch stěn ohniště

$$F_{st} = 541,785 \text{ m}^2 \quad (4.1.3)$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

Pro membránové stěny je úhlový součinitel $x_i = 1$ [1]. Z celkového povrchu stěny ohniště byly odečteny plochy 6 hořáků o průměru 1,1 m. Plochy průlezů a průhledítek jsou vzhledem k celkové ploše téměř zanedbatelné. Nicméně pro úplnost budeme uvažovat 0,5 m² těchto průlezů a průhledítek pro každou stěnu.

$$F_{hoř} = 6 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 6 \cdot \frac{\pi \cdot 1,1^2}{4} = 5,702 \text{ m}^2 \quad (4.1.4)$$

$$F_{průlezy} = 4 \cdot 0,5 = 2 \text{ m}^2 \quad (4.1.5)$$

$$F_{ús} = \sum F_i \cdot x_i = \text{m}^2 \quad (4.1.6)$$

$$F_{ús} = (F_{st} - F_{hoř} - F_{průlezy}) \cdot x_i = (541,785 - 5,702 - 2) \cdot 1 = 534,173 \text{ m}^2$$

4.2 Tepelný výpočet ohniště

Cílem tohoto výpočtu je určení teploty spalin na výstupu z ohniště T_0 , resp. ϑ_0 . Tento výpočet je založen na teorii podobnosti tepelných procesů, které probíhají ve spalovací komoře. Teplota na konci ohniště se nejprve odhadne a poté následuje několik výpočtů, dokud

je rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou teplotou menší než $\pm 30^\circ\text{C}$. Následující postup je provedený po několika iteracích.

4.2.1 Teplota spalin na výstupu z ohniště

Vychází z rovnice pro poměrnou teplotu spalin na výstupu z ohniště.

$$\theta_0 = \frac{T_0}{T_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} \Rightarrow \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (4.2.1)$$

4.2.2 Součinitel M

Charakterizuje průběh teplot v ohništi. Závisí především na druhu spalovaného paliva a na poloze maximální teploty plamene.

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_0 = 0,54 - 0,2 \cdot 0,297 = 0,481 \quad (4.2.2)$$

Poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene

Pro horizontální upořádání hořáků a vertikální proudění spalin platí:

$$x_0 = x_h = 0,297 \quad (4.2.3)$$

Poměrná výška hořáků

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{4,423}{14,9} = 0,297 \quad (4.2.4)$$

Celkově je ve spalovací komoře 6 hořáků. 2 stávající plynové hořáky v bočních stěnách, 2 nové plynové hořáky v přední stěně a 2 nové plynové hořáky v zadní stěně spalovací komory.

$$h_h = \frac{n_1 \cdot h_h^1 + n_2 \cdot h_h^2}{n_1 + n_2} = \frac{2 \cdot 3,71 + 4 \cdot 4,78}{2 + 6} = 4,423 \text{ m} \quad (4.2.5)$$

4.2.3 Boltzmanovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot F_{st} \cdot T_a^3} \quad (4.2.6)$$

$$B_o = \frac{0,995 \cdot 16,802 \cdot 6,308}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 541,875 \cdot (1846,912 + 273,15)^3} = 0,551$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{so}}{\eta_k - Z_{so}} = 1 - \frac{0,5}{92,834 - 0,5} = 0,995 \quad (4.2.7)$$

Střední celkové měrné teplo spalín

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{10677,76 - 6262,44}{1846,912 - 1147} = 6,308 \quad (4.2.8)$$

- odhad teploty $\vartheta_0 = 1147 \text{ }^\circ\text{C}$, její entalpie $I_0 = 6262,44 \text{ kJ/Nm}^3$

Teplo uvolněné ve spalovací komoře

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - Z_{CO} - Z_C - Z_{fs}}{100 - Z_C} + Q_{VZ} - Q_{VZV} + r \cdot I_{sp \text{ od}} \quad (4.2.9)$$

$$I_u = 9985,652 \cdot \frac{100 - 0,015}{100} + 693,634 = 10677,76 \text{ kJ/Nm}^3$$

- této entalpii odpovídá adiabatická teplota $\vartheta_a = 1846,91 \text{ }^\circ\text{C}$, při $\alpha = 1,1$.

Teplo přivedené do kotle se spalovacím vzduchem

Teplota ohřátého vzduchu je $197 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{VZ} = \alpha \cdot I_{VZ \text{ min}} = 1,1 \cdot 630,576 = 693,634 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (4.2.10)$$

Součinitel tepelné efektivnosti stěn

Součinitel zanešení stěn pro plynná paliva $\xi = 0,65 [-]$.

$$\overline{\psi} = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,65 = 0,65 \quad (4.2.11)$$

4.2.4 Stupeň černosti ohniště

Charakterizuje sálavost plamene a stěn ohniště. [2]

$$a_0 = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \bar{\psi}} \quad (4.2.12)$$

Efektivní stupeň černosti plamene

Je závislý na druhu paliva a způsobu spalování. Určí se pomocí emisních vlastností tříatomových plynů, částic sazí koksu a popílku. Součinitel charakterizující podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene pro spalování plyných paliv při objemovém zatížení $q_V < 400 \text{ kW/m}^3$ v jednodrostorovém ohništi je $m = 0,1$. [2]

$$a_{pl} = m \cdot a_{SV} + (1 - m) \cdot a_{NS} = 0,1 \cdot 0,838 + (1 - 0,1) \cdot 0,428 = 0,469 \quad (4.2.13)$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{NS} = 1 - e^{-k_{NS} \cdot 0,1 \cdot s} = 1 - e^{-1,105 \cdot 0,1 \cdot 5,049} = 0,428 \quad (4.2.14)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

- objemová část tříatomových plynů r_{SP} je již vypočítána z rovnice (2.2.6)

$$k_{NS} = k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{\vartheta_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (4.2.15)$$

$$k_{NS} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 5,049}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1147}{1000} \right) \cdot 0,301 = 1,105$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,301 = 0,0301 \text{ MPa} \quad (4.2.16)$$

- tlak v ohništi je $p = 0,1 \text{ MPa}$.

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{759,983}{541,875} = 5,049 \text{ m} \quad (4.2.17)$$

Stupeň černosti svítivé části plamene

$$a_{SV} = 1 - e^{-k_{SV} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3,602 \cdot 0,1 \cdot 5,049} = 0,838 \quad (4.2.18)$$

Součinitel zeslabení sálání svítivými tříatomovými plyny

$$k_{SV} = k_{SP} \cdot r_{SP} + k_C = k_{NS} + k_C = 1,105 + 2,497 = 3,602 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (4.2.19)$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_C = 0,3 \cdot (2 - \alpha_0) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{\vartheta_0}{1000} - 0,5\right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (4.2.20)$$

$$k_C = 0,3 \cdot (2 - 1,1) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1147}{1000} - 0,5\right) \cdot 0,416 = 2,497 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (4.2.21)$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku paliva

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} \cdot C_m H_n \quad (4.2.22)$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 11,957 + \frac{2}{6} \cdot 1,435\right) = 0,416$$

Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (4.2.23)$$

$$\vartheta_0 = \frac{1846,912 + 273,15}{1 + 0,481 \cdot \left(\frac{0,576}{0,551}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1146,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rozdíl mezi odhadovanou a vypočtenou teplotou ϑ_0

$$\Delta t_0 = \vartheta_{0,\text{odhadovaná}} - \vartheta_0 = 1147 - 1146,44 = 0,56 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.2.24)$$

- podmínka $\Delta \vartheta_0 = \pm 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ je splněna.

Množství tepla odevzdaného v ohništi

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,995 \cdot (10677,76 - 6262,44) = 4391,66 \text{ kJ/m}^3 \quad (4.2.25)$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_o)}{F_{\text{úš}}} \quad (4.2.26)$$

$$\bar{q} = \frac{0,995 \cdot 16,802 \cdot (10677,76 - 6262,44)}{534,173} = 138,134 \text{ kW/m}^2$$

5 Bilanční výpočet teplosměnných ploch ze strany média

5.1 Tlakové ztráty

Při proudění média v potrubí vznikají tlakové ztráty. Z důvodu požadovaného tlaku páry na výstupním přehříváku (přehřívák 4), musí být tlak napájecí vody navýšen o tlakové ztráty všech výhřevných ploch. Tlakové ztráty v jednotlivých teplosměnných plochách byly stanoveny na základě odborné konzultace.

$$p_{NV} = p_{pp} + \Delta p_{P4} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{výp} + \Delta p_{EKO} \quad (5.1.1)$$

$$p_{NV} = 9,6 + 0,22 + 0,15 + 0,13 + 0 + 2 = 12,7 \text{ MPa}$$

5.2 Výkony jednotlivých teplosměnných ploch

Součet dílčích výkonů všech teplosměnných ploch by měl být roven celkovému výkonu. Regulace teploty přehřáté páry je provedena pomocí vstříků napájecí vody, jejichž součet byl zvolen 4 %.

5.2.1 Přehřívák P4

Je poslední teplosměnnou plochou ze strany média.

Tab. 5.1 Parametry páry v P4

	$p \text{ [MPa]}$	$t \text{ [}^\circ\text{C]}$	$i \text{ [kJ/kg]}$
<i>vstup</i>	9,82	442,83	3225,429
<i>výstup</i>	9,6	525	3443,429

Tepelný výkon přehříváku P4

$$Q_{P4} = M_{pp} \cdot (i_{P4 \text{ out}} - i_{P4 \text{ in}}) \quad (5.2.1)$$

$$Q_{P4} = 55,56 \cdot (3443,429 - 3225,429) = 12111,11 \text{ kW}$$

5.2.2 Přehřívák P3

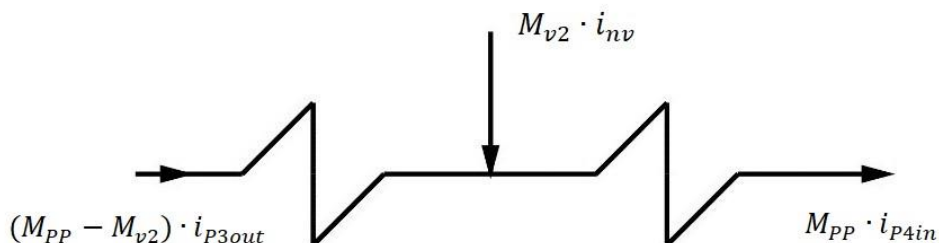
Mezi přehříváky P3 a P4 je zaveden druhý vstřík (z hlediska proudění páry), který byl na základě odborné konzultace zvolen 2,75 % z objemu napájecí vody. Schéma vstříku je znázorněno na Obr. 5.1.

Tab. 5.2 Parametry páry v P3

	p [MPa]	t [°C]	i [kJ/kg]
<i>vstup</i>	9,97	408,37	3123,542
<i>výstup</i>	9,82	469,85	3298,542

Množství druhého vstříku

$$M_{v2} = 0,0275 \cdot M_{pp} = 0,0275 \cdot 55,56 = 1,528 \text{ kg/s} \quad (5.2.2)$$



Obr. 5.1 Schéma druhého vstříku

Bilanční rovnice druhého vstříku

$$i_{P3out} = \frac{M_{pp} \cdot i_{P4in} - M_{v2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v2}} \quad (5.2.3)$$

$$i_{P3out} = \frac{55,56 \cdot 3225,429 - 1,528 \cdot 639,885}{55,56 - 1,528} = 3298,542 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný výkon přehříváku P3

$$Q_{P3} = (M_{pp} - M_{v2}) \cdot (i_{P3out} - i_{P3in}) \quad (5.2.4)$$

$$Q_{P3} = (55,56 - 1,528) \cdot (3298,542 - 3123,542) = 9454,86 \text{ kW}$$

5.2.3 Deskový přehřívák

Je deskový přehřívák umístěný na konci ohniště.

Tab. 5.3 Parametry páry v DP

	p [MPa]	t [°C]	i [kJ/kg]
<i>vstup</i>	10,1	332,52	2843,542
<i>výstup</i>	9,97	408,37	3123,542

Tepelný výkon přehříváku P2

$$Q_{P2} = (M_{pp} - M_{v2}) \cdot (i_{P2\ out} - i_{P2\ in}) \quad (5.2.5)$$

$$Q_{P2} = (55,56 - 1,528) \cdot (3123,542 - 2843,542) = 15127,78\ kW$$

5.2.4 Přehřívák P1

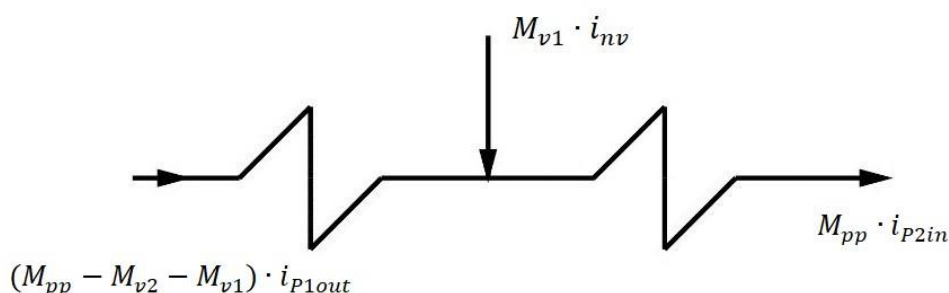
Mezi přehřívák P1 a DP je zaveden první vstřík. Na základě odborné konzultace byla jeho hodnota stanovena na 1,25 % z objemu napájecí vody. Schéma vstříku je znázorněné na Obr. 5.2.

Tab. 5.4 Parametry páry v P1

	$p\ [MPa]$	$t\ [^{\circ}C]$	$i\ [kJ/kg]$
<i>vstup</i>	10,7	316,01	2712,295
<i>výstup</i>	10,1	338,69	2872,235

Množství prvního vstříku

$$M_{v1} = 0,0125 \cdot M_{pp} = 0,0125 \cdot 55,56 = 0,694\ kg/s \quad (5.2.6)$$



Obr. 5.2 Schéma prvního vstříku

Bilanční rovnice prvního vstříku

$$i_{P1out} = \frac{(M_{pp} - M_{v2}) \cdot i_{P2in} - M_{v1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}} \quad (5.2.7)$$

$$i_{P1out} = \frac{(55,56 - 1,528) \cdot 2843,542 - 0,649 \cdot 639,885}{55,56 - 1,528 - 0,694} = 2872,235\ kJ/kg$$

Tepelný výkon přehříváku P1

$$Q_{P1} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{P1\ out} - i_{P1\ in}) \quad (5.2.8)$$

$$Q_{P1} = (55,56 - 1,528 - 0,694) \cdot (2872,235 - 2712,295) = 8533,33 \text{ kW}$$

5.2.5 Výparník

Ve výparníku dochází k fázové přeměně vody na sytou páru. Tlak je při tomto ději konstantní a odpovídá tlaku v bubnu. Teplota je v ideálním případě při vypařování rovněž konstantní, nicméně je nutné počítat s nedohřevem vody v ekonomizéru.

Tab. 5.5 Parametry média ve výparníku

	$p \text{ [MPa]}$	$t \text{ [°C]}$	$i \text{ [kJ/kg]}$
<i>vstup</i>	10,7	280,06	1234,845
<i>výstup</i>	10,7	316,01	2712,295

Tepelný výkon výparníku

$$Q_{výp} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{v \text{ out}} - i_{v \text{ in}}) \quad (5.2.9)$$

$$Q_{výp} = (55,56 - 1,528 - 0,694) \cdot (2712,295 - 1234,845) = 78797,37 \text{ kW}$$

5.2.6 Ohřívák vody (ekonomizér)

Teplota vody na výstupu z ekonomizéru je 280 °C, přičemž nedohřev vody od meze syté kapaliny je 36 °C.

Tab. 5.6 Parametry vody v EKU

	$p \text{ [MPa]}$	$t \text{ [°C]}$	$i \text{ [kJ/kg]}$
<i>vstup</i>	12,7	150	639,885
<i>výstup</i>	10,7	280,07	1234,885

Tepelný výkon ekonomizéru

$$Q_{EKO} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{EKO \text{ out}} - i_{EKO \text{ in}}) \quad (5.2.10)$$

$$Q_{EKO} = (55,56 - 1,528 - 0,694) \cdot (1234,885 - 639,885) = 31733,33 \text{ kW}$$

5.3 Součet tepelných výkonů všech ploch

$$Q_C = Q_{EKO} + Q_{výp} + Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} + Q_{P4} \quad (5.3.1)$$

$$Q_C = 31733,33 + 78797,37 + 8533,33 + 15127,78 + 9454,86 + 12111,11$$

$$Q_C = 155757,79 \text{ kW}$$

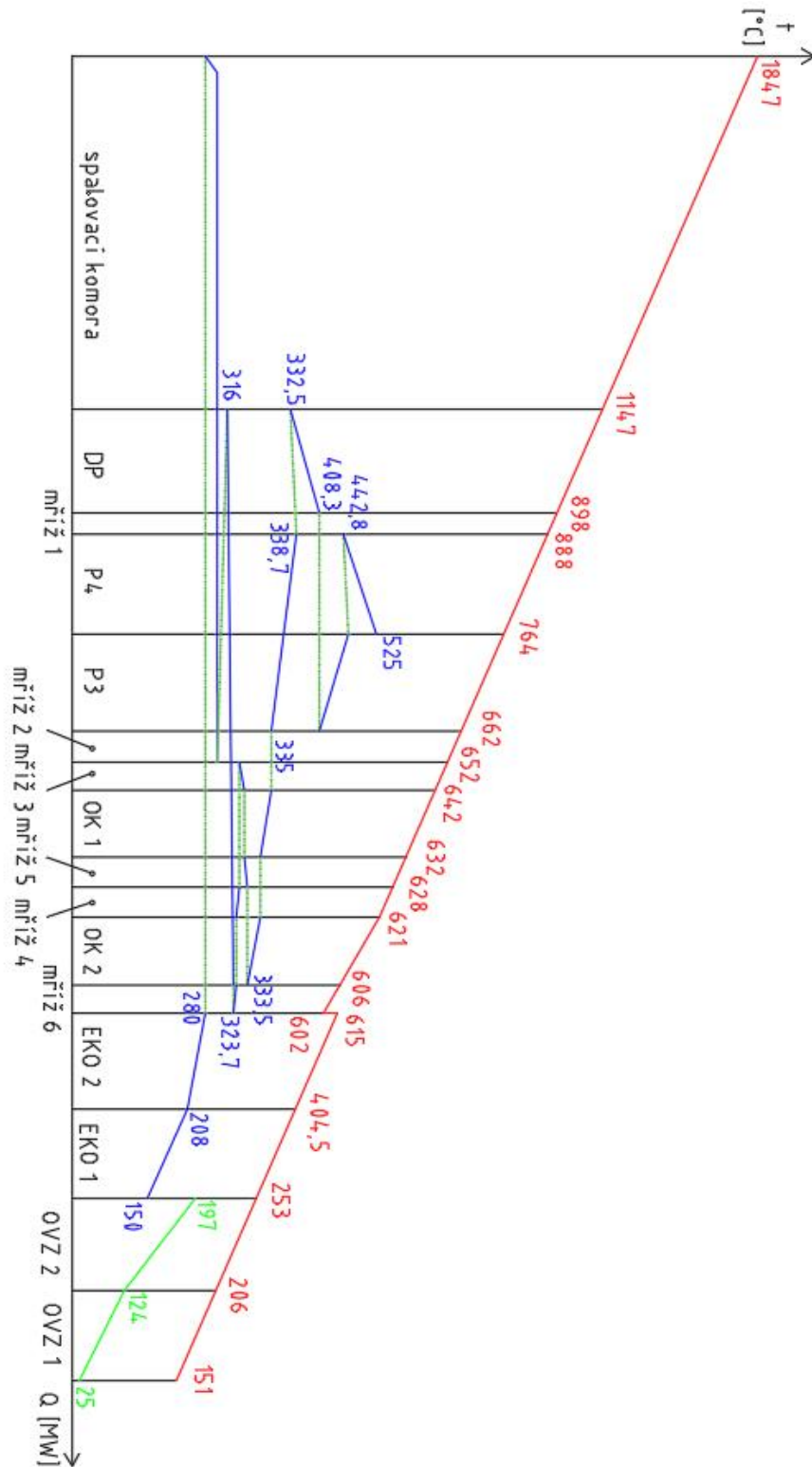
Kontrola

Celkový výkon ze strany média Q_V je znám z rovnice (3.3-1).

$$Q_c - Q_V = 155757,79 - 155752,44 = 5,35 \text{ kW} \quad (5.3.2)$$

6 Pilový diagram

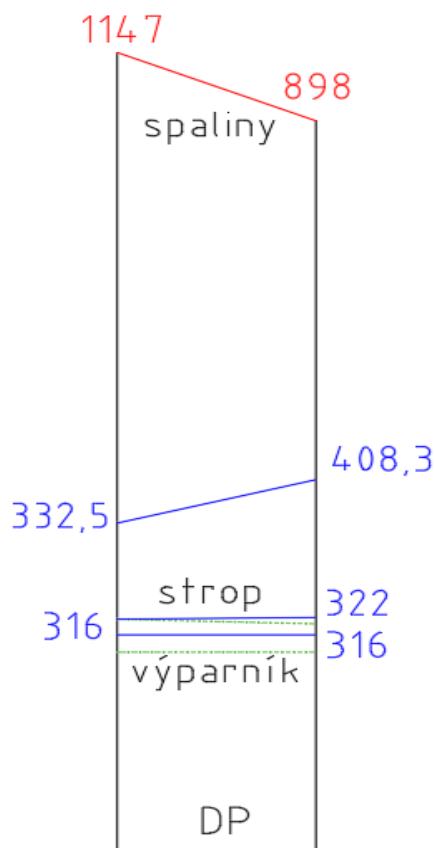
Znázorňuje průběh vypočítaných teplot spalin, vody a vzduchu na jednotlivých výhřevných plochách kotle. Teplota spalin na vstupu do EKA 2 byla určena jako střední teplota spalin na výstupu z obrátové komory 1 a 2. Uvedené číselné hodnoty jsou v °C.



Obr. 6.1 Pilový diagram

7 Oblast deskového přehříváku

Oblast se nachází v prvním tahu kotle nad prostorem ohniště. Tato oblast se skládá z několika paralelních výhřevných ploch. Hlavní výhřevnou plochou je deskový přehřívák páry (dále jen DP), dále spaliny v této oblasti předávají teplo stropnímu přehříváku páry (součást P1) a části výparníku, který je tvořen membránovou stěnou.



Obr. 7.1 Oblast DP (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	8,878 m
šířka	A	8,96 m
hloubka	B	5,76 m
výstup	E	6,5 m

7.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (6262,44 - 4768,44) = 24967,31 \text{ kW} \quad (7.1.1)$$

Teplota spalin na vstupu do oblasti deskového přehříváku je rovna teplotě spalin na konci ohniště, rovnice (4.2.24). Teplota spalin na výstupu z oblasti byla zvolena 901 °C a její hodnota byla na konci výpočtu ověřena v rámci kontroly tepelné bilance.

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{1147 + 898}{2} = 1022,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (7.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin se vždy určí pomocí lineární interpolace pro střední teplotu spalin a pro procentuální obsah vody ve spalinách, který se určí z rovnice (2.2.4) a je po celou dobu konstantní.

Procentuální obsah vody ve spalinách

$$r_{H_2O} = 0,186 \cdot 100 = 18,6 \text{ \%} \quad (7.1.3)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,117 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000184 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,602$$

V počítané oblasti dochází ke změně směru proudění spalin. Výhřevná plocha deskového přehříváku tvoří kombinaci příčného a podélného proudění toku spalin. Je tedy nutné určit rychlost spalin v podélném i příčném směru.

Rychlost spalin při příčném proudění

$$w_{sp,př} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp,př}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{55,52} \cdot \left(1 + \frac{1022,5}{273,15}\right) = 5,00 \text{ m/s} \quad (7.1.4)$$

Světlý průřez pro příčné proudění spalin

$$F_{sp,př} = A \cdot E - n_d \cdot E \cdot d_1 = 8,96 \cdot 6,5 - 11 \cdot 6,5 \cdot 0,038 = 55,52 \text{ m}^2 \quad (7.1.5)$$

Rychlost spalin při podélném proudění

$$w_{sp,pod} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp,pod}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{51,02} \cdot \left(1 + \frac{1022,5}{273,15}\right) \quad (7.1.6)$$

$$w_{sp,pod} = 5,44 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro podélné proudění spalín

$$F_{sp,pod} = A \cdot B - n_d \cdot 4 \cdot n_z \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 8,96 \cdot 5,76 - 11 \cdot 4 \cdot 12 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} \quad (7.1.7)$$

$$F_{sp,pod} = 51,01 \text{ m}^2$$

7.2 Deskový přehřívák P2

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
Počet desek	n_d	11
Počet trubek v desce	n_z	12
Celkový počet trubek	n	132
Příčná rozteč	s_1	0,75 m
Podélná rozteč	s_2	0,041 m

7.2.1 Střední součinitel prostupu tepla

$$\bar{k} = \frac{k_{př} \cdot S_{př} + k_{pod} \cdot S_{pod}}{S_{př} + S_{pod}} \quad (7.2.1)$$

$$\bar{k} = \frac{67,52 \cdot 311,03 + 45,3 \cdot 53,11}{311,03 + 53,11} = 64,28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel prostupu tepla pro příčné proudění

$$k_{př} = \frac{\psi \cdot \alpha_{1,př}}{1 + \frac{\alpha_{1,př}}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 81,73}{1 + \frac{81,73}{2826,18}} = 67,52 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.2.2)$$

Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k_{pod} = \frac{\psi \cdot \alpha_{1,pod}}{1 + \frac{\alpha_{1,pod}}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 54,32}{1 + \frac{54,32}{2826,18}} = 45,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.2.3)$$

- ψ je součinitel tepelné efektivnosti [-]. Pro plynná paliva se uvažuje hodnota 0,85.

Součinitel přestupu tepla pro příčné proudění

$$\alpha_{1,př} = \xi \cdot \left(\alpha_{k,př} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{2 \cdot s_2 \cdot x_d} + \alpha_s \right) \quad (7.2.4)$$

$$\alpha_{1,př} = 0,85 \cdot \left(28,34 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{2 \cdot 0,041 \cdot 0,96} + 53,17 \right) = 81,73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- kde ξ je součinitel využití deskového přehříváku, jehož hodnota je při rychlostech spalin vyšších než 4 m/s rovna 0,85 [-], a x_d je úhlový součinitel desek, který je roven 0,96 [-].

Součinitel přestupu tepla konvekci ze strany spalin pro příčné proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp,př} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.2.5)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,60 \cdot \frac{0,117}{0,038} \cdot \left(\frac{5,00 \cdot 0,038}{0,000184} \right)^{0,65} \cdot 0,602^{0,33} = 28,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,75}{0,038} = 19,74; \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,041}{0,038} = 1,079 \quad (7.2.6)$$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,079}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,598$$

- pro $\sigma_1 > 3$ se do vzorce dosazuje $\sigma_1 = 3$

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění

$$\alpha_{1,pod} = \xi \cdot \left(\alpha_{k,pod} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{2 \cdot s_2 \cdot x_d} + \alpha_s \right) \quad (7.2.7)$$

$$\alpha_{1,pod} = 0,85 \cdot \left(7,07 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{2 \cdot 0,041 \cdot 0,96} + 53,17 \right) = 54,32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín pro podélné proudění

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp,pod} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (7.2.8)$$

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{0,117}{2,21} \cdot \left(\frac{5,44 \cdot 2,21}{0,000184} \right)^{0,8} \cdot 0,602^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 7,07 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ekvivalentní průměr kanálu pro podélné proudění

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp,pod}}{O} = \frac{4 \cdot 51,01}{92,47} = 2,21 \text{ m} \quad (7.2.9)$$

Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot (A + B) + n_d \cdot 4 \cdot n_z \cdot \pi \cdot D \quad (7.2.10)$$

$$O = 2 \cdot (8,96 + 5,76) + 11 \cdot 4 \cdot 12 \cdot \pi \cdot 0,038 = 92,47 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (7.2.11)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,254 \cdot 1295,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{668,59}{1295,65} \right)^{3,6}}{1 - \frac{668,59}{1295,65}}$$

$$\alpha_s = 53,17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (7.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (7.2.16)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,293} = 0,254 \quad (7.2.12)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (7.2.13)$$

$$k \cdot p \cdot s = (2,165 + 0) \cdot 0,1 \cdot 1,34 = 0,293$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7.2.14)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 1,35}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1295,65}{1000} \right) \cdot 0,301 = 2,165$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} \quad (7.2.15)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{8,96 \cdot 2,97 \cdot 8,878}{364,14 + 2 \cdot ((8,878 \cdot 2,97) + (2,97 \cdot 8,96) + (8,96 \cdot 8,878))} = 1,35 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 370,44 + 25 = 395,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.2.16)$$

- při spalování plynných paliv je $\Delta t = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Platí pro všechny výhřevné plochy.

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (7.2.17)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0696}{0,03} \cdot \left(\frac{13,76 \cdot 0,03}{246,05 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0238} \right)^{0,8} \cdot 1,30^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 2826,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{332,5 + 408,37}{2} = 370,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.2.18)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,1 + 9,97}{2} = 10,035 \text{ Mpa} \quad (7.2.19)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 246,048 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,0696 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Pr} = 1,30$$

$$\nu = 0,0238 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528}{0,0933} \cdot 0,0238 = 13,76 \text{ m/s} \quad (7.2.20)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 132 = 0,0933 \text{ m}^2 \quad (7.2.21)$$

7.2.2 Výhřevná plocha

Výhřevná plocha desek

$$S = n_d \cdot S_d \cdot x_d = 11 \cdot 34,483 \cdot 0,96 = 364,14 \text{ m}^2 \quad (7.2.22)$$

Plocha jedné desky

$$S_d = 2 \cdot (8,878 \cdot 2,97 - (7,57 \cdot 0,633 + 4,3)) = 34,48 \text{ m}^2 \quad (7.2.23)$$

Plocha desek pro podélné proudění

$$S_{pod} = 2 \cdot 1,076 \cdot 2,337 \cdot 11 \cdot 0,96 = 53,11 \text{ m}^2 \quad (7.2.24)$$

Plocha desek pro příčné proudění

$$S_{př} = 364,14 - 53,11 = 311,03 \text{ m}^2 \quad (7.2.25)$$

- rozměry desek odečteny z výkresové dokumentace

7.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{814,50 - 491,63}{\ln\left(\frac{814,50}{491,63}\right)} = 652,07 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.2.26)$$

$$\Delta t_v = 1147 - 332,5 = 814,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 898 - 408,37 = 491,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

7.2.4 Teplo pohlcené deskovým přehřívákem

$$Q_{DP} = \frac{\bar{k} \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{64,27 \cdot 364,14 \cdot 652,07}{1000} = 15285,58 \text{ kW} \quad (7.2.27)$$

7.3 Membránová stěna (část výparníku)

Vnější průměr trubky	D	0,0603 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0503 m
Počet trubek	n	370
Délka trubek	l_{tr}	8,878 m

7.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 57,52 = 48,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 7,07 + 50,18 = 57,25 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě deskového přehříváku, rovnice (7.2.8)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (7.4.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,254 \cdot 1295,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,16}{1295,65}\right)^{3,6}}{1 - \frac{614,16}{1295,65}}$$

$$\alpha_s = 50,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (7.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (7.4.4)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání triatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě deskového přehříváku. Viz rovnice (7.2.12), (7.2.13), (7.2.14) a (7.2.15).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 316,01 + 25 = 341,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.4.4)$$

- teplota proudu média je ve výparníku konstantní

7.3.2 Výhřevná plocha

$$S = 2 \cdot (5,76 \cdot 8,878) + 8,96 \cdot 8,878 + 2,367 \cdot 8,96 = 203,11 \text{ m}^2 \quad (7.4.5)$$

7.3.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{830,99 - 581,99}{\ln\left(\frac{830,99}{581,99}\right)} = 699,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.4.6)$$

$$\Delta t_v = 1147 - 316,01 = 830,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 898 - 316,01 = 581,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

7.3.4 Teplo pohlcené výparníkem

$$Q_{výp,DP} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{48,66 \cdot 203,11 \cdot 699,12}{1000} = 6910,13 \text{ kW} \quad (7.4.7)$$

7.4 Stropní přehřívák (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	140
Délka trubky	l_{tr}	5,76 m
Rozteč	s	0,0625 m

7.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 57,41}{1 + \frac{57,41}{4286,65}} = 48,15 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.5.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 7,07 + 50,34 = 57,41 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.5.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě deskového přehříváku, rovnice (7.2.8)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (7.5.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,254 \cdot 1295,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{617,16}{1295,65}\right)^{3,6}}{1 - \frac{617,16}{1295,65}}$$

$$\alpha_s = 50,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- α_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (7.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (7.5.4)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání triatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě deskového přehříváku. Viz rovnice (7.2.12), (7.2.13), (7.2.14) a (7.2.15).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 319,01 + 25 = 344,01 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.5.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (7.5.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,3729}{0,0365} \cdot \left(\frac{6,35 \cdot 0,0365}{661,157 \cdot 10^{-7} \cdot 0,01743} \right)^{0,8} \cdot 1,113^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 4286,65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{316,01 + 322,01}{2} = 319,01 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.5.6)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,7 + 10,4}{2} = 10,55 \text{ Mpa} \quad (7.5.7)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 661,157 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,3729 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,113$$

$$\nu = 0,01743 \text{ m}^2/\text{s}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot v = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,146} \cdot 0,0238 = 6,35 \text{ m/s} \quad (7.5.8)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 140 = 0,146 \text{ m}^2 \quad (7.5.9)$$

7.4.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n \cdot x_{str,DP} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 5,76 \cdot 140 \cdot 0,75 = 84,55 \text{ m}^2 \quad (7.5.10)$$

- $x_{str,DP}$ je úhlový součinitel trubkové stěny stropního přehříváku v oblasti deskového přehříváku, jehož hodnota byla odečtena z grafu [1] a je rovna 0,75.

7.4.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{830,99 - 575,99}{\ln\left(\frac{830,99}{575,99}\right)} = 695,72 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.5.11)$$

$$\Delta t_v = 1147 - 316,01 = 830,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 898 - 322,01 = 575,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

7.4.4 Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti DP

$$Q_{str,DP} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{48,15 \cdot 84,55 \cdot 695,72}{1000} = 2832,51 \text{ kW} \quad (7.5.12)$$

7.5 Celková tepelná bilance oblasti DP

$$Q_c = Q_{DP} + Q_{výp,DP} + Q_{str,DP} \quad (7.6.1)$$

$$Q_c = 15249,76 + 6910,13 + 2832,51 = 24992,40 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{24967,31 - 24992,40}{24967,31} \cdot 100 = -0,1 \% \quad (7.6.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

8 Oblast mříže 1

Oblast se nachází na výstupu ze spalovací komory za oblastí deskového přehříváku. Je tvořena jednořadou výparníkovou mříží omývanou příčným prouděním spalin.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	6,5 m
šířka	A	0,0603 m
hloubka	B	8,96 m

8.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{pV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (4768,44 - 4710,53) = 967,78 \text{ kW} \quad (8.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{898 + 888}{2} = 893 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,105 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000154 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,615$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp,př}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{35,90} \cdot \left(1 + \frac{893}{273,15}\right) = 6,95 \text{ m/s} \quad (8.1.3)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 6,5 \cdot 8,96 - 57 \cdot 6,5 \cdot 0,0603 = 35,90 \text{ m}^2 \quad (8.1.4)$$

8.2 Mříž 1

Vnější průměr trubky	D	0,0603 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0503 m
Počet trubek	n	57
Délka trubek	l_{tr}	6,5 m
Příčná rozteč	s_1	0,157 m

8.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 28,47 = 24,20 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 4,40 + 24,06 = 28,47 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (8.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,097 \cdot \frac{0,105}{0,0603} \cdot \left(\frac{6,95 \cdot 0,0603}{0,000154} \right)^{0,65} \cdot 0,615^{0,33}$$

$$\alpha_k = 4,40 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitele

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (1 - 2) = 0,90$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,157}{0,0603} = 2,60; \sigma_2 = 0 \quad (8.2.4)$$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 2,6 - 3) \cdot \left(1 - \frac{0}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,097$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (8.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,155 \cdot 1166,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,16}{1166,2}\right)^{3,6}}{1 - \frac{614,16}{1166,2}}$$

$$\alpha_s = 24,06 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (8.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (8.2.10)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,169} = 0,155 \quad (8.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,8 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,352 = 0,169$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,352}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1166,2}{1000} \right) \cdot 0,301 = 4,8$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} \quad (8.2.9)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{6,5 \cdot 8,96 \cdot 0,0603}{35,90} = 0,352 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 316,01 + 25 = 344,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.2.10)$$

8.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0603 \cdot 6,5 \cdot 57 = 70,19 \text{ m}^2 \quad (8.2.11)$$

8.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{581,99 - 571,99}{\ln\left(\frac{581,99}{571,99}\right)} = 576,98 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.2.12)$$

$$\Delta t_v = 898 - 316,01 = 581,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 888 - 316,01 = 571,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

8.2.4 Teplo pohlcené mříží 1

$$Q_{mriz1} = Q_c = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{24,20 \cdot 70,187 \cdot 576,98}{1000} = 979,92 \text{ kW} \quad (8.2.13)$$

8.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 1

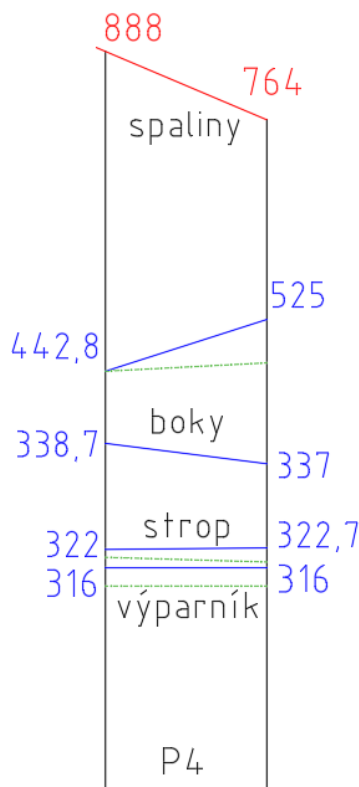
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{967,78 - 979,92}{967,78} \cdot 100 = -1,25 \% \quad (8.3.1)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

9 Oblast přehříváku 4

Oblast se nachází za výparníkovou mříží v přechodovém tahu kotle. V oblasti se nachází několik paralelních výhřevných ploch. Hlavní výhřevnou plochu zde tvoří souproutý svazkový přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek (P4). Boční stěny a strop jsou součástí přehříváku 1 a z důvodu rozdílných teplot média jsou počítány samostatně. Jako poslední zde spaliny předávají teplo výparníku, který tvoří zešíkmené dno přechodového tahu v podobě membránové stěny.



Obr. 9.1 Oblast P4 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

vstupní výška	H	8 m
výstupní výška	E	5,735 m
šířka	A	1,9 m
hloubka	B	8,96 m

9.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (4710,53 - 3993,15) = 11988,61 \text{ kW} \quad (9.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{888 + 764}{2} = 826 \text{ °C} \quad (9.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0986 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00014 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,622$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{46,08} \cdot \left(1 + \frac{826}{273,15}\right) = 5,1 \text{ m/s} \quad (9.1.3)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = \frac{2F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 48,94 \cdot 43,54}{48,94 + 43,54} = 46,08 \text{ m}^2 \quad (9.1.4)$$

Vstupní průřez

$$F_1 = 6,5 \cdot 8,96 - 36 \cdot 6,8 \cdot 0,038 = 48,94 \text{ m}^2 \quad (9.1.5)$$

Výstupní průřez

$$F_2 = 5,735 \cdot 8,96 - 36 \cdot 5,735 \cdot 0,038 = 43,54 \text{ m}^2 \quad (9.1.6)$$

9.2 Přehřívák 4

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,0056 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0268 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Střední Podélná rozteč	s_2	0,076 m
Počet trubek v 1. řadě	n_1	36
Počet hadů	n_h	4
Celkový počet trubek	n_{tr}	144
Střední délka trubky	l_{tr}	24,84 m

9.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 94,31}{1 + \frac{94,31}{2842,21}} = 77,59 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 61,87 + 32,44 = 94,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.2.3)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,36 \cdot \frac{0,0986}{0,038} \cdot \left(\frac{5,1 \cdot 0,038}{0,00014} \right)^{0,6} \cdot 0,622^{0,33}$$

$$\alpha_k = 61,87 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,038} = 6,58; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,076}{0,038} = 2 \quad (9.2.4)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{6,58 - 1}{3,85 - 1} = 1,96 \quad (9.2.5)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 6,58^2 + 2^2} = 3,85 \quad (9.2.6)$$

- pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a při $\sigma_1 \geq 3$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,96^{0,1} = 0,36 \quad (9.2.7)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (9.2.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot 1099,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{782,07}{1099,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{782,07}{1099,15}}$$

$$\alpha_s = 32,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (9.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (9.2.13)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,216} = 0,194 \quad (9.2.9)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (9.2.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,01 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,539 = 0,216$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (9.2.11)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,539}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1099,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 4,01$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,076}{0,038^2} - 1 \right) = 0,539 \text{ m} \quad (9.2.12)$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 483,92 + 25 = 508,92 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.2.13)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.2.14)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0756}{0,0268} \cdot \left(\frac{22,48 \cdot 0,0268}{288,503 \cdot 10^{-7} \cdot 0,03287} \right)^{0,8} \cdot 0,996^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 2842,21 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{442,83 + 525}{2} = 483,92 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.2.15)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{9,82 + 9,6}{2} = 9,71 \text{ Mpa} \quad (9.2.16)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 288,503 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,0756 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,996$$

$$\nu = 0,03287 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56}{0,0812} \cdot 0,03287 = 22,48 \text{ m/s} \quad (9.2.17)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0268^2}{4} \cdot 144 = 0,0812 \text{ m}^2 \quad (9.2.18)$$

9.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 24,84 \cdot 144 = 427,02 \text{ m}^2 \quad (9.2.19)$$

9.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{445,17 - 239}{\ln\left(\frac{445,17}{239}\right)} = 331,47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.2.20)$$

$$\Delta t_v = 888 - 442,83 = 445,17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 764 - 525 = 239 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souproudé zapojení

9.2.4 Teplo pohlcené přehřívákem 4

$$Q_{P4} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{77,59 \cdot 427,02 \cdot 331,47}{1000} = 10928,02 \text{ kW} \quad (9.2.21)$$

9.3 Membránová stěna (část výparníku)

Vnější průměr trubky	D	0,0603 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0503 m
Počet trubek	n	56
Délka trubek	l_{tr}	2,96 m

9.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 36,41 = 30,95 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 10,07 + 26,33 = 36,41 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0986}{0,39} \cdot \left(\frac{5,10 \cdot 0,39}{0,00014} \right)^{0,8} \cdot 0,622^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 10,07 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ekvivalentní průměr kanálu pro podélné proudění

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 46,08}{467,73} = 0,39 \text{ m} \quad (9.3.4)$$

Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot \left(\frac{(8 + 5,735)}{2} + 36 \cdot (0,038 + 6,27) \right) = 467,73 \text{ m} \quad (9.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (9.3.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot 1099,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,16}{1099,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{614,16}{1099,15}}$$

$$\alpha_s = 26,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (9.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (9.3.7)

Stupeň černosti proudu spalín, optická hustota spalín, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 4. Viz rovnice (9.2.9), (9.2.10), (9.2.11) a (9.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 316,01 + 25 = 341,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.3.7)$$

- teplota proudu média je ve výparníku konstantní

9.3.2 Výhřevná plocha

$$S = 2,96 \cdot 8,96 = 26,52 \text{ m}^2 \quad (9.3.8)$$

9.3.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{571,99 - 447,99}{\ln\left(\frac{571,99}{447,99}\right)} = 507,47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.3.9)$$

$$\Delta t_v = 888 - 316,01 = 571,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 768 - 316,01 = 447,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

9.3.4 Teplo pohlcené výparníkem

$$Q_{vyp,P4} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{30,95 \cdot 26,52 \cdot 507,47}{1000} = 416,49 \text{ kW} \quad (9.3.10)$$

9.4 Stropní přehřívák (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	70
Délka trubky	l_{tr}	3,4 m
Rozteč	s	0,128 m

9.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 36,61}{1 + \frac{36,61}{5302,53}} = 30,91 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 10,07 + 26,54 = 36,61 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě výparníku, rovnice (9.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (9.4.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot 1099,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{620,5}{1099,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{620,5}{1099,15}}$$

$$\alpha_s = 26,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (9.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (9.4.5)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 4. Viz rovnice (9.2.9), (9.2.10), (9.2.11) a (9.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 322,35 + 25 = 347,35 \text{ °C} \quad (9.4.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.4.6)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,3393}{0,0365} \cdot \left(\frac{6,35 \cdot 0,0365}{614,386 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0184}\right)^{0,8} \cdot 1,143^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 5302,53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{322 + 322,7}{2} = 322,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.4.7)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,4 + 10,37}{2} = 10,385 \text{ Mpa} \quad (9.4.8)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 614,386 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,3393 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,143$$

$$\nu = 0,0184 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,109} \cdot 0,0184 = 9 \text{ m/s} \quad (9.4.9)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 70 = 0,109 \text{ m}^2 \quad (9.4.10)$$

9.4.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n \cdot x_{str,P4} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 3,4 \cdot 70 \cdot 0,55 = 18,3 \text{ m}^2 \quad (9.4.11)$$

- $x_{str,P4}$ je úhlový součinitel trubkové stěny stropního přehříváku v oblasti přehříváku 4, jehož hodnota byla odečtena z grafu [1] a je rovna 0,55.

9.4.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{566 - 441,3}{\ln\left(\frac{566}{441,3}\right)} = 501,07 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.4.12)$$

$$\Delta t_v = 888 - 322 = 566 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 764 - 322,7 = 441,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souproudé zapojení

9.4.4 Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti P4

$$Q_{str,P4} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{30,91 \cdot 18,3 \cdot 501,07}{1000} = 283,41 \text{ kW} \quad (9.4.13)$$

9.5 Boční stěny (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	40
Střední délka trubky	l_{tr}	6,87 m
Rozteč	s	0,09 m

9.5.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 37,1}{1 + \frac{37,1}{5222,48}} = 31,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 10,07 + 27,02 = 36,61 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.5.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě výparníku, rovnice (9.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (9.5.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot 1099,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{634,99}{1099,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{634,99}{1099,15}}$$

$$\alpha_s = 27,02 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (9.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (9.5.4)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání triatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 4. Viz rovnice (9.2.9), (9.2.10), (9.2.11) a (9.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 336,84 + 25 = 361,84 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.5.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.5.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,1977}{0,0365} \cdot \left(\frac{13,25 \cdot 0,0365}{416,355 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0208}\right)^{0,8} \cdot 1,273^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 5222,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{335 + 338,69}{2} = 336,84 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.5.6)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,15 + 10,1}{2} = 10,125 \text{ Mpa} \quad (9.5.7)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 416,355 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,1977 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Pr} = 1,273$$

$$\nu = 0,0208 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,084} \cdot 0,0208 = 13,25 \text{ m/s} \quad (9.5.8)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 80 = 0,084 \text{ m}^2 \quad (9.5.9)$$

- Počet trubek v boční stěně je pro tuto výpočtovou oblast 20. Pro správné určení rychlosti páry a průřezu, musíme do výpočtu dosadit celkový počet trubek v jedné boční stěně $n = 80$, jelikož všechny tyto trubky mají stejnou rozváděcí komoru.

9.5.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n \cdot x_{boky,P4} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 6,87 \cdot 40 \cdot 0,65 = 24,96 \text{ m}^2 \quad (9.5.10)$$

- $x_{boky,P4}$ je úhlový součinitel trubkové stěny stropního přehříváku v oblasti přehříváku 4, jehož hodnota byla odečtena z grafu [1] a je rovna 0,65.

9.5.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{549,31 - 429}{\ln\left(\frac{549,31}{429}\right)} = 486,36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.5.11)$$

$$\Delta t_v = 888 - 338,69 = 549,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 764 - 335 = 429 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

9.5.4 Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti P4

$$Q_{boky,P4} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{31,31 \cdot 24,96 \cdot 486,36}{1000} = 380,11 \text{ kW} \quad (9.5.12)$$

9.6 Celková tepelná bilance oblasti P4

$$Q_c = Q_{P4} + Q_{výp,P4} + Q_{str,P4} + Q_{boky,P4} \quad (9.6.1)$$

$$Q_c = 10982,02 + 416,49 + 284,41 + 380,11 = 12062,04 \text{ kW}$$

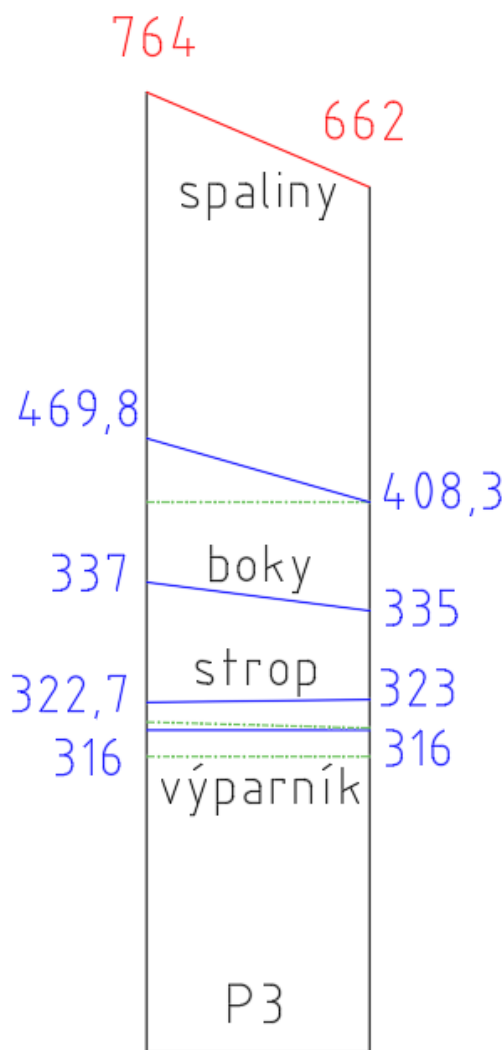
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{11988,61 - 12062,04}{11988,61} \cdot 100 = -0,61 \% \quad (9.6.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

10 Oblast přehříváku 3

Navazuje na předchozí oblast přehříváku 4 a nachází se rovněž v přechodovém tahu kotle. V oblasti se nachází několik paralelních výhřevných ploch. Hlavní výhřevnou plochu zde tvoří protiproudý svazkový přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek (P3). Boční stěny a strop jsou součástí přehříváku 1 a z důvodu rozdílných teplot média jsou počítány samostatně. Jako poslední zde spaliny předávají teplo výparníku, který tvoří zešikmené dno přechodového tahu v podobě membránové stěny.



Obr. 10.1 Oblast P3 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

vstupní výška	H	5,735 m
výstupní výška	E	3,7 m
šířka	A	1,7 m
hloubka	B	8,96 m

10.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{pV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3993,15 - 3415,39) = 9656,25 \text{ kW} \quad (10.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{764 + 662}{2} = 713 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (10.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0881 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000116 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,633$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{34,56} \cdot \left(1 + \frac{713}{273,15}\right) = 6,1 \text{ m/s} \quad (10.1.3)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = \frac{2F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 44,22 \cdot 28,36}{44,22 + 28,36} = 34,56 \text{ m}^2 \quad (10.1.4)$$

Vstupní průřez

$$F_1 = 5,735 \cdot 8,96 - 36 \cdot 5,235 \cdot 0,038 = 44,22 \text{ m}^2 \quad (10.1.5)$$

Výstupní průřez

$$F_2 = 3,7 \cdot 8,96 - 36 \cdot 3,5 \cdot 0,038 = 28,36 \text{ m}^2 \quad (10.1.6)$$

10.2 Přehřívák 3

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Podélná rozteč	s_2	0,05 m
Počet trubek v 1. řadě	n_1	36
Počet hadů	n_h	4
Celkový počet trubek	n_{tr}	144
Střední délka trubky	l_{tr}	25,84 m

10.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 91,43}{1 + \frac{91,43}{2591,84}} = 75,07 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 69,93 + 21,51 = 91,43 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (10.2.3)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,37 \cdot \frac{0,0881}{0,038} \cdot \left(\frac{6,1 \cdot 0,038}{0,000116} \right)^{0,6} \cdot 0,633^{0,33}$$

$$\alpha_k = 69,93 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,038} = 6,58; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,05}{0,038} = 1,32 \quad (10.2.4)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{6,58 - 1}{3,54 - 1} = 2,19 \quad (10.2.5)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 6,58^2 + 1,32^2} = 3,54 \quad (10.2.6)$$

- pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a při $\sigma_1 \geq 3$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 2,19^{0,1} = 0,36 \quad (10.2.7)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plyných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.2.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 986,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{737,26}{986,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{737,26}{986,15}}$$

$$\alpha_s = 21,51 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (10.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (10.2.13)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,186} = 0,17 \quad (10.2.9)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (10.2.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,44 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,343 = 0,186$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plyných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (10.2.11)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,343}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{986,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 5,44$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,05}{0,038^2} - 1 \right) = 0,343 \text{ m} \quad (10.2.12)$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 439,11 + 25 = 464,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.2.13)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.2.14)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0711}{0,028} \cdot \left(\frac{17,91 \cdot 0,028}{271,698 \cdot 10^{-7} \cdot 0,02939} \right)^{0,8} \cdot 1,051^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 2591,84 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{408,37 + 469,85}{2} = 439,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.2.15)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{9,97 + 9,82}{2} = 9,895 \text{ Mpa} \quad (10.2.16)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 271,698 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,0711 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,051$$

$$\nu = 0,02939 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528}{0,0887} \cdot 0,02939 = 17,91 \text{ m/s} \quad (10.2.17)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 144 = 0,0887 \text{ m}^2 \quad (10.2.18)$$

10.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 25,85 \cdot 144 = 444,38 \text{ m}^2 \quad (10.2.19)$$

10.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{294,15 - 253,63}{\ln\left(\frac{294,15}{253,63}\right)} = 273,39 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10.2.20)$$

$$\Delta t_v = 764 - 469,85 = 294,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 662 - 408,37 = 253,63 \text{ }^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

10.2.4 Teplo pohlcené přehřívákem 3

$$Q_{P3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{75,07 \cdot 444,38 \cdot 273,39}{1000} = 9120,35 \text{ kW} \quad (10.2.21)$$

10.3 Membránová stěna (část výparníku)

Vnější průměr trubky	D	0,0603 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0503 m
Počet trubek	n	56
Délka trubek	l_{tr}	2,65 m

10.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 30,09 = 25,58 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 11,95 + 18,14 = 30,09 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0881}{0,42} \cdot \left(\frac{6,10 \cdot 0,42}{0,000116} \right)^{0,8} \cdot 0,633^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ekvivalentní průměr kanálu pro podélné proudění

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 34,56}{326,63} = 0,42 \text{ m} \quad (10.3.4)$$

Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot \left(\frac{(5,735 + 3,7)}{2} + 36 \cdot (0,038 + 4,37) \right) = 326,63 \text{ m} \quad (10.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.3.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 986,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,16}{986,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{614,16}{986,15}}$$

$$\alpha_s = 18,14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- α_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (10.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (10.3.7)

Stupeň černosti proudu spalín, optická hustota spalín, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 3. Viz rovnice (10.2.9), (10.2.10), (10.2.11) a (10.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 316,01 + 25 = 341,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.3.7)$$

- teplota proudu média je ve výparníku konstantní

10.3.2 Výhřevná plocha

$$S = 2,65 \cdot 8,96 = 23,69 \text{ m}^2 \quad (10.3.8)$$

10.3.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{447,99 - 345,99}{\ln\left(\frac{447,99}{345,99}\right)} = 394,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.3.9)$$

$$\Delta t_v = 768 - 316,01 = 447,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 662 - 316,01 = 345,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

10.3.4 Teplo pohlčené výparníkem

$$Q_{výp,P3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{25,58 \cdot 23,69 \cdot 394,8}{1000} = 239,22 \text{ kW} \quad (10.3.10)$$

10.4 Stropní přehřívák (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	70
Délka trubky	l_{tr}	1,7 m
Rozteč	s	0,128 m

10.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 30,26}{1 + \frac{30,26}{5280,1}} = 25,58 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 11,95 + 18,31 = 30,26 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě výparníku, rovnice (10.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.4.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 986,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{621}{986,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{621}{986,15}}$$

$$\alpha_s = 18,31 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (10.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (10.4.4)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 3. Viz rovnice (10.2.9), (10.2.10), (10.2.11) a (10.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 322,85 + 25 = 347,85 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.4.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.4.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,3342}{0,0365} \cdot \left(\frac{9,07 \cdot 0,0365}{607,29 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0185} \right)^{0,8} \cdot 1,143^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 5280,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{322,7 + 323}{2} = 322,85 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.4.6)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,37 + 10,35}{2} = 10,36 \text{ Mpa} \quad (10.4.7)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 607,29 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,3342 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,148$$

$$\nu = 0,0185 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,109} \cdot 0,0185 = 9,07 \text{ m/s} \quad (10.4.8)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 70 = 0,109 \text{ m}^2 \quad (10.4.9)$$

10.4.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n \cdot x_{str,P3} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 1,7 \cdot 70 \cdot 0,6 = 9,98 \text{ m}^2 \quad (10.4.10)$$

- $x_{str,P3}$ je úhlový součinitel trubkové stěny stropního přehříváku v oblasti přehříváku 3, jehož hodnota byla odečtena z grafu [1] a je rovna 0,6.

10.4.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{441,3 - 339}{\ln\left(\frac{441,3}{339}\right)} = 387,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.4.11)$$

$$\Delta t_v = 764 - 322,7 = 441,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 662 - 323 = 339 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

10.4.4 Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti P3

$$Q_{str,P3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{25,58 \cdot 9,98 \cdot 387,9}{1000} = 99,03 \text{ kW} \quad (10.4.12)$$

10.5 Boční stěny (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	40
Střední délka trubky	l_{tr}	4,72 m
Rozteč	s	0,09 m

10.5.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 30,62}{1 + \frac{30,62}{5433,63}} = 25,88 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.5.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 11,95 + 18,67 = 30,62 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.5.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

- součinitel je stejný jako v případě výparníku, rovnice (10.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.5.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 986,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{634,99}{986,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{634,99}{986,15}}$$

$$\alpha_s = 18,67 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (10.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (10.5.4)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě přehříváku 3. Viz rovnice (10.2.9), (10.2.10), (10.2.11) a (10.2.12).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 336,85 + 25 = 361,85 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10.5.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.5.6)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,1977}{0,0365} \cdot \left(\frac{13,25 \cdot 0,0365}{416,355 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0208} \right)^{0,8} \cdot 1,273^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 5433,63 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{335 + 338,69}{2} = 336,84 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10.5.7)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,15 + 10,1}{2} = 10,125 \text{ Mpa} \quad (10.5.8)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 416,355 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,1977 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,273$$

$$\nu = 0,0208 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,084} \cdot 0,0208 = 13,25 \text{ m/s} \quad (10.5.9)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 80 = 0,084 \text{ m}^2 \quad (10.5.10)$$

- Počet trubek v boční stěně je pro tuto výpočtovou oblast 20. Pro správné určení rychlosti páry a průřezu, musíme do výpočtu dosadit celkový počet trubek v jedné boční stěně $n = 80$, jelikož všechny tyto trubky mají stejnou rozváděcí komoru.

10.5.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n \cdot x_{boky,P3} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 4,72 \cdot 40 \cdot 0,65 = 17,15 \text{ m}^2 \quad (10.5.11)$$

- $x_{boky,P3}$ je úhlový součinitel trubkové stěny stropního přehříváku v oblasti deskového přehříváku, jehož hodnota byla odečtena z grafu [1] a je rovna 0,65.

10.5.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{425,31 - 327}{\ln\left(\frac{425,31}{327}\right)} = 374 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.5.12)$$

$$\Delta t_v = 764 - 338,69 = 425,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 662 - 335 = 327 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

10.5.4 Teplo pohlcené stropním bočními stěnami v oblasti P3

$$Q_{boky,P3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{25,88 \cdot 17,15 \cdot 374}{1000} = 165,99 \text{ kW} \quad (10.5.13)$$

10.6 Celková tepelná bilance oblasti P3

$$Q_c = Q_{P3} + Q_{výp,P3} + Q_{str,P3} + Q_{boky,P3} \quad (10.6.1)$$

$$Q_c = 9120,35 + 239,22 + 99,03 + 165,99 = 9624,6 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{9656,25 - 9624,6}{9656,25} \cdot 100 = 0,33 \% \quad (10.6.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

11 Oblast mříže 2

Oblast se nachází za oblastí přehříváku 3. Je tvořena dvouřadou výparníkovou mříží omývanou příčným prouděním spalin. Ve skutečnosti se nad mříží nachází ještě krátký usek stropního přehříváku (P1). Vzhledem k zanedbatelně malé ploše je stropní přehřívák započítán v oblasti přehříváku 3.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	3,7 m
šířka	A	0,12 m
hloubka	B	8,96 m

11.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3415,39 - 3359,47) = 840,26 \text{ kW} \quad (11.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{662 + 652}{2} = 657 \text{ °C} \quad (11.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0844 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000106 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,639$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp,př}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{20,66} \cdot \left(1 + \frac{657}{273,15}\right) = 9,63 \text{ m/s} \quad (11.1.3)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 3,7 \cdot 8,96 - 56 \cdot 3,7 \cdot 0,0603 = 20,66 \text{ m}^2 \quad (11.1.4)$$

11.2 Mříž 2

Vnější průměr trubky	D	0,0603 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,005 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0503 m
Počet trubek	n	56
Délka trubek	l_{tr}	3,7 m
Příčná rozteč	s_1	0,32 m
Podélná rozteč	s_2	0,12 m

11.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 81,31 = 69,11 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 59,28 + 22,03 = 81,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0844}{0,0603} \cdot \left(\frac{9,63 \cdot 0,0603}{0,000106} \right)^{0,65} \cdot 0,639^{0,33}$$

$$\alpha_k = 59,28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

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

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,32}{0,0603} = 5,31; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,12}{0,0603} = 1,99 \Rightarrow c_s = 1 \quad (11.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (11.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,234 \cdot 930,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,16}{930,2}\right)^{3,6}}{1 - \frac{614,16}{930,2}}$$

$$\alpha_s = 22,03 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (11.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (11.2.10)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,266} = 0,234 \quad (11.2.6)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (11.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (3,94 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,68 = 0,266$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (11.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,68}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{930,2}{1000} \right) \cdot 0,301 = 3,94$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (11.2.9)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,32 \cdot 0,12}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,68 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 316,01 + 25 = 344,01 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.2.10)$$

11.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0603 \cdot 3,7 \cdot 56 = 39,25 \text{ m}^2 \quad (11.2.11)$$

11.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{345,99 - 335,99}{\ln \left(\frac{345,99}{335,99} \right)} = 340,97 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.2.12)$$

$$\Delta t_v = 662 - 316,01 = 345,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 652 - 316,01 = 335,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souproudé zapojení

11.2.4 Teplo pohlcené mříží 2

$$Q_{mriz2} = Q_c = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{69,11 \cdot 39,25 \cdot 340,97}{1000} = 925,02 \text{ kW} \quad (11.2.14)$$

11.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 2

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{967,78 - 979,92}{967,78} \cdot 100 = -1,25 \% \quad (11.3.1)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

12 Oblast mříže 3

Oblast se nachází za výparníkovou mříží 2. Je tvořena dvouřadou přehřívákovou mříží, která je součástí přehříváku 1. Ve skutečnosti se nad mříží nachází ještě krátký usek stropního přehříváku (P1). Vzhledem k zanedbatelně malé ploše je stropní přehřívák započítán v oblasti obrátové komory 1.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	0,16 m
hloubka	B	8,96 m

12.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3359,47 - 3303,6) = 933,62 \text{ kW} \quad (12.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{652 + 642}{2} = 647 \text{ °C} \quad (12.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0819 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000104 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,64$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) = \frac{16,802 \cdot 3,478}{30,18} \cdot \left(1 + \frac{647}{273,15}\right) = 6,52 \text{ m/s} \quad (12.1.3)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 4,6 \cdot 8,96 - 36 \cdot 4,6 \cdot 0,045 = 30,18 \text{ m}^2 \quad (12.1.4)$$

12.2 Mříž 3 (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	72
Délka trubek	l_{tr}	4,6 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Podélná rozteč	s_2	0,13 m

12.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 73,96}{1 + \frac{73,96}{6546,49}} = 62,17 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 50,29 + 23,67 = 73,96 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (12.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0819}{0,0445} \cdot \left(\frac{6,52 \cdot 0,0445}{0,000104} \right)^{0,65} \cdot 0,64^{0,33}$$

$$\alpha_k = 50,29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

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

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,0445} = 5,62; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,13}{0,0445} = 2,92 \Rightarrow c_s = 1 \quad (12.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (12.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,251 \cdot 920,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{628,65}{920,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{628,65}{920,15}}$$

$$\alpha_s = 23,67 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (12.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (12.2.10)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,29} = 0,251 \quad (12.2.6)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (12.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (3,63 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,797 = 0,29$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (12.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,797}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{920,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 3,63$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (12.2.9)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,13}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,797 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 330,5 + 25 = 355,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.2.10)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (12.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,259}{0,0365} \cdot \left(\frac{14,11 \cdot 0,0365}{502,241 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0199} \right)^{0,8} \cdot 1,217^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 6546,49 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{329 + 332}{2} = 330,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.2.12)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,2 + 10,17}{2} = 10,185 \text{ Mpa} \quad (12.2.13)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 502,241 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,259 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,217$$

$$\nu = 0,0199 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot \nu = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,0753} \cdot 0,0199 = 14,11 \text{ m/s} \quad (12.2.14)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 72 = 0,0753 \text{ m}^2 \quad (12.2.15)$$

12.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 4,6 \cdot 72 = 46,3 \text{ m}^2 \quad (12.2.16)$$

12.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{323 - 310}{\ln\left(\frac{323}{310}\right)} = 316,46 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.2.17)$$

$$\Delta t_v = 652 - 329 = 323 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 642 - 332 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$$

- souprouté zapojení

12.2.4 Teplo pohlcené mříží 3

$$Q_{mriz3} = Q_c = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{62,17 \cdot 46,3 \cdot 316,46}{1000} = 910,91 \text{ kW} \quad (12.2.18)$$

12.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 3

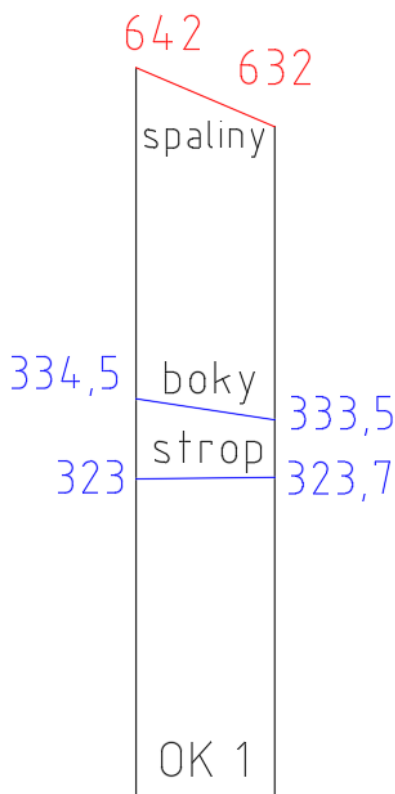
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{933,62 - 910,91}{933,62} \cdot 100 = 2,43 \% \quad (12.2.19)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalín považovat za správnou.

13 Obratová komora 1

Je oblast, která se nachází za mříží 3. V této oblasti dochází k rozdělení proudu spalin. Polovina objemu spalin změní směr a proudí přes mříž 5 do druhého spalinového tahu kotle. Druhá polovina objemu proudí v horizontálním směru přes mříž 4 do prostoru obratové komory 2. V Obratové komoře 1 spaliny předávají teplo stropnímu přehříváku a bočním stěnám, přičemž obě výhřevné plochy jsou součástí přehříváku 1. V oblasti obratové komory se neuvažuje konvekce, pouze sálání. [1]



Obr. 13.1 Oblast OK1 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	2,3 m
hloubka	B	8,96 m

13.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3303,6 - 3247,74) = 933,62 \text{ kW} \quad (13.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{642 + 632}{2} = 637 \text{ °C} \quad (13.1.2)$$

13.2 Stropní přehřívák (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	140
Délka trubky	l_{tr}	2,3 m
Rozteč	s	0,0625 m

13.2.1 Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti OK1

$$Q_{str,OK1} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{str,OK1}}{1000} = \frac{45,27 \cdot (637 - 348,35) \cdot 45,02}{1000} = 588,23 \text{ kW} \quad (13.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (13.2.2)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,483 \cdot 910,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{621,5}{910,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{621,5}{910,15}}$$

$$\alpha_s = 45,27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (13.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (13.2.8)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,659} = 0,483 \quad (13.2.3)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (13.2.4)$$

$$k \cdot p \cdot s = (1,367 + 0) \cdot 0,1 \cdot 4,82 = 0,659$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plyných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (13.2.5)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 4,82}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{910,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 1,367$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = \frac{4,6 \cdot 2,3 \cdot 8,96}{70,74} = 4,82 \text{ m} \quad (13.2.6)$$

Celkový povrch stěn sálající vrstvy

$$F_{st} = F_{str,OK1} + F_{boky,OK1} = 45,02 + 25,72 = 70,74 \text{ m}^2 \quad (13.2.7)$$

$$F_{str,OK1} = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,3 \cdot 140 = 45,02 \text{ m}^2$$

$$F_{boky,OK1} = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 4,6 \cdot 20 \cdot 2 = 25,72 \text{ m}^2$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 323,35 + 25 = 348,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13.2.8)$$

13.3 Boční stěny (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	40
Délka trubky	l_{tr}	4,6 m
Rozteč	s	0,125 m

13.3.1 Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti OK1

$$Q_{boky,OK1} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{str,OK1}}{1000} = \frac{45,9 \cdot (637 - 359,25) \cdot 25,72}{1000} = 327,94 \text{ kW} \quad (13.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (13.3.2)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,483 \cdot 910,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{632,4}{910,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{632,4}{910,15}}$$

$$\alpha_s = 45,9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (13.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (13.3.3)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě stropního přehříváku. Viz rovnice (13.2.3), (13.2.4), (13.2.5) a (13.2.6).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 334,25 + 25 = 359,25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.3.3)$$

13.4 Celková tepelná bilance oblasti OK1

$$Q_c = Q_{str,OK1} + Q_{boky,OK1} \quad (13.4.1)$$

$$Q_c = 588,23 + 327,94 = 916,17 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{933,62 - 916,17}{933,62} \cdot 100 = 1,86 \% \quad (13.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

14 Oblast mříže 5

Oblast se nachází na spodním výstupu z obratové komory 1. Je tvořena dvouřadou mříží, která je součástí přehříváku 1. Spaliny z této oblasti dále proudí vertikálně do druhého tahu kotle. Objem proudících spalin je poloviční z důvodu rozdělení proudu spalin v oblasti obratové komory 1.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	0,16 m
hloubka	B	8,96 m

14.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3247,74 - 3223,39) = 406,9 \text{ kW} \quad (14.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{632 + 628}{2} = 630 \text{ °C} \quad (14.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0804 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000101 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,641$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící přes mříž 5 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (14.1.3)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{16,92} \cdot \left(1 + \frac{630}{273,15}\right) = 5,71 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 2,3 \cdot 8,96 - 36 \cdot 2,3 \cdot 0,0445 = 16,92 \text{ m}^2 \quad (14.1.4)$$

14.2 Mříž 5 (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	72
Délka trubek	l_{tr}	2,3 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Podélná rozteč	s_2	0,15 m

14.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 70,67}{1 + \frac{70,67}{6345,42}} = 59,41 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 46,20 + 24,47 = 70,67 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (14.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0804}{0,0445} \cdot \left(\frac{5,71 \cdot 0,0445}{0,000101} \right)^{0,65} \cdot 0,641^{0,33}$$

$$\alpha_k = 50,29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

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

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,0445} = 5,62; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,0445} = 3,37 \Rightarrow c_s = 1 \quad (14.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (14.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,269 \cdot 903,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{630,9}{903,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{630,9}{903,15}}$$

$$\alpha_s = 24,47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (14.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (14.2.10)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,314} = 0,269 \quad (14.2.6)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (14.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (3,387 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,926 = 0,314$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (14.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,926}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{903,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 3,387$$

- hodnoty r_{sp}, r_{H_2O}, p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (14.2.9)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,15}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,926 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 332,75 + 25 = 357,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.2.10)$$

Součinitel přestupu tepla konvekci ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (14.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,237}{0,0365} \cdot \left(\frac{14,11 \cdot 0,0365}{471,744 \cdot 10^{-7} \cdot 0,02026} \right)^{0,8} \cdot 1,237^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 6345,42 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{332 + 333,5}{2} = 332,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.2.12)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,17 + 10,15}{2} = 10,16 \text{ Mpa} \quad (14.2.13)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 471,744 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,237 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,237$$

$$\nu = 0,02026 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot v = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,0753} \cdot 0,02026 = 14,34 \text{ m/s} \quad (14.2.14)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 72 = 0,0753 \text{ m}^2 \quad (14.2.15)$$

14.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,3 \cdot 72 = 23,15 \text{ m}^2 \quad (14.2.16)$$

14.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{300 - 294,5}{\ln\left(\frac{300}{294,5}\right)} = 297,24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.2.17)$$

$$\Delta t_v = 632 - 332 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 628 - 333,5 = 294,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- souproudé zapojení

14.2.4 Teplo pohlcené mříží 5

$$Q_{mriz5} = Q_c = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{59,41 \cdot 23,15 \cdot 297,24}{1000} = 408,8 \text{ kW} \quad (14.2.18)$$

14.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 5

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{406,9 - 408,8}{406,9} \cdot 100 = -0,47 \% \quad (14.2.19)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

15 Oblast mříže 4

Oblast se nachází mezi obratovou komorou 1 a obratovou komorou 2. Je tvořena dvouřadou mříží, která je součástí přehříváku 1. Do této oblasti proudí horizontálně a jejich objem je poloviční z důvodu rozdělení proudu v oblasti obratové komory 1.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	0,16 m
hloubka	B	8,96 m

15.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3223,39 - 3186,28) = 620,08 \text{ kW} \quad (15.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{628 + 621}{2} = 624,5 \text{ °C} \quad (15.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0799 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,642$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící přes mříž 4 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (15.1.3)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{33,85} \cdot \left(1 + \frac{624,5}{273,15}\right) = 2,85 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 4,6 \cdot 8,96 - 36 \cdot 4,6 \cdot 0,0445 = 16,92 \text{ m}^2 \quad (15.1.4)$$

15.2 Mříž 4 (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	72
Délka trubek	l_{tr}	4,6 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Podélná rozteč	s_2	0,15 m

15.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 53,5}{1 + \frac{53,5}{6761,01}} = 45,12 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (15.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 29,46 + 24,04 = 70,67 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (15.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (15.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0799}{0,0445} \cdot \left(\frac{2,85 \cdot 0,0445}{0,0001} \right)^{0,65} \cdot 0,642^{0,33}$$

$$\alpha_k = 29,46 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

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

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,0445} = 5,62; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,0445} = 3,37 \Rightarrow c_s = 1 \quad (15.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (15.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,27 \cdot 897,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{625,9}{897,65}\right)^{3,6}}{1 - \frac{625,9}{897,65}}$$

$$\alpha_s = 24,04 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (15.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (15.2.10)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,314} = 0,27 \quad (15.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (15.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (3,398 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,926 = 0,314$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (15.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,926}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{897,65}{1000} \right) \cdot 0,301 = 3,398$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (15.2.9)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,15}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,926 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 327,75 + 25 = 357,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15.2.10)$$

Součinitel přestupu tepla konvekci ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (15.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,2855}{0,0365} \cdot \left(\frac{13,83 \cdot 0,0365}{539,358 \cdot 10^{-7} \cdot 0,01954} \right)^{0,8} \cdot 1,192^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 6761,01 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{326,5 + 329}{2} = 327,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15.2.12)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,23 + 10,2}{2} = 10,215 \text{ Mpa} \quad (15.2.13)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 539,358 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,2855 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,192$$

$$\nu = 0,01954 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot v = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,0753} \cdot 0,01954 = 13,83 \text{ m/s} \quad (15.2.14)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 72 = 0,0753 \text{ m}^2 \quad (15.2.15)$$

15.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 4,6 \cdot 72 = 46,3 \text{ m}^2 \quad (15.2.16)$$

15.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{299 - 294,5}{\ln\left(\frac{299}{294,5}\right)} = 296,74 \text{ }^\circ\text{C} \quad (15.2.17)$$

$$\Delta t_v = 628 - 329 = 299 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 621 - 326,5 = 294,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

15.2.4 Teplo pohlcené mříží 5

$$Q_{mriz5} = Q_c = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{45,12 \cdot 46,3 \cdot 296,74}{1000} = 619,97 \text{ kW} \quad (15.2.18)$$

15.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 5

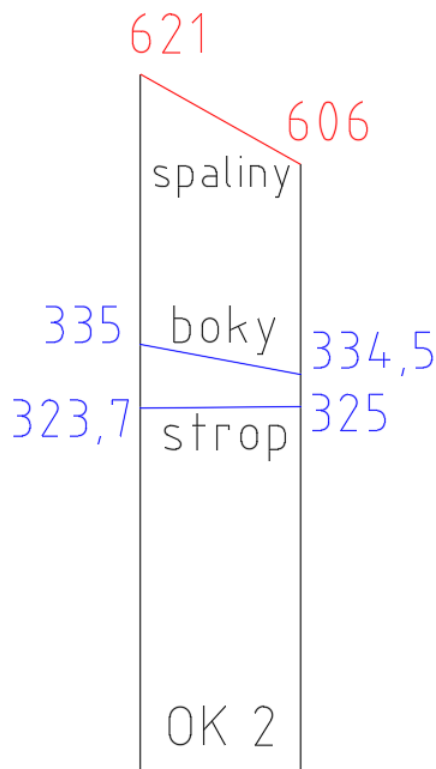
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{620,08 - 619,97}{620,08} \cdot 100 = 0,02 \% \quad (15.3.1)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

16 Obratová komora 2

Je oblast, která se nachází za mříží 4. V této oblasti dochází ke změně směru proudu spalin, které dále proudí přes mříž 6 do druhého tahu kotle. V obratové komoře 2 spaliny předávají teplo stropnímu přehříváku, zadní stěně a bočním stěnám, přičemž všechny výhřevné plochy jsou součástí přehříváku 1. V oblasti obratové komory se neuvažuje konvekce, pouze sálání. [1]



Obr. 16.1 Oblast OK2 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	2,3 m
hloubka	B	8,96 m

16.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3186,28 - 3102,48) = 1400,44 \text{ kW} \quad (16.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{621 + 606}{2} = 613,5 \text{ °C} \quad (16.1.2)$$

16.2 Stropní přehřívák a zadní stěna (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	140
Délka trubky	l_{tr}	6,9 m
Rozteč	s	0,0625 m

16.2.1 Teplo pohlcené stropním přehřívákem v oblasti OK2

$$Q_{str+zs,OK2} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{str+zs,OK1}}{1000} \quad (16.2.1)$$

$$Q_{str+zs,OK2} = \frac{32,52 \cdot (613,5 - 324,35) \cdot 135,05}{1000} = 1160,08 \text{ kW}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (16.2.2)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,372 \cdot 886,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{622,5}{886,65}\right)^{3,6}}{1 - \frac{622,5}{886,65}}$$

$$\alpha_s = 32,52 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (16.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (16.2.8)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,465} = 0,372 \quad (16.2.3)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (16.2.4)$$

$$k \cdot p \cdot s = (2,189 + 0) \cdot 0,1 \cdot 2,12 = 0,465$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (16.2.5)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 2,12}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{886,65}{1000} \right) \cdot 0,301 = 2,189$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = \frac{4,6 \cdot 2,3 \cdot 8,96}{160,77} = 2,12 \text{ m} \quad (16.2.6)$$

Celkový povrch stěn sálající vrstvy

$$F_{st} = F_{str+zs,OK2} + F_{boky,OK2} = 135,05 + 25,72 = 160,77 \text{ m}^2 \quad (16.2.7)$$

$$F_{str+zs,OK2} = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 6,9 \cdot 140 = 135,05 \text{ m}^2$$

$$F_{boky,OK2} = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 4,6 \cdot 20 \cdot 2 = 25,72 \text{ m}^2$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 324,35 + 25 = 349,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16.2.8)$$

16.3 Boční stěny (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	40
Délka trubky	l_{tr}	4,6 m
Rozteč	s	0,125 m

16.3.1 Teplo pohlcené bočními stěnami v oblasti OK2

$$Q_{boky,OK2} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{str,OK2}}{1000} \quad (16.3.1)$$

$$Q_{boky,OK2} = \frac{33,11 \cdot (613,5 - 334,25) \cdot 25,72}{1000} = 216,54 \text{ kW}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (16.3.2)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,372 \cdot 886,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{632,4}{886,65}\right)^{3,6}}{1 - \frac{632,4}{886,65}}$$

$$\alpha_s = 33,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (16.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (16.3.3)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě stropního přehříváku. Viz rovnice (16.2.3), (16.2.4), (16.2.5) a (16.2.6).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 334,25 + 25 = 359,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16.3.3)$$

16.4 Celková tepelná bilance oblasti OK2

$$Q_c = Q_{str+zs,OK2} + Q_{boky,OK2} \quad (16.4.1)$$

$$Q_c = 1160,08 + 216,54 = 1376,63 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1400,44 - 1376,63}{1400,44} \cdot 100 = 1,7 \% \quad (16.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

17 Oblast mříže 6

Oblast se nachází na výstupu z obrátové komory 2. Je tvořena dvouřadou mříží, která je součástí přehřívačku 1. Spaliny z této oblasti dále proudí vertikálně do druhého tahu kotle. Objem proudících spalin je poloviční z důvodu rozdělení proudu spalin v oblasti obrátové komory 1.

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	4,6 m
šířka	A	0,16 m
hloubka	B	8,96 m

17.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3102,48 - 3080,14) = 373,45 \text{ kW} \quad (17.1.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{606 + 602}{2} = 604 \text{ °C} \quad (17.1.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,078 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000096 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,644$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící přes mříž 6 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (17.1.3)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{16,92} \cdot \left(1 + \frac{604}{273,15}\right) = 5,54 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = H \cdot B - n \cdot H \cdot D = 2,3 \cdot 8,96 - 36 \cdot 2,3 \cdot 0,0445 = 16,92 \text{ m}^2 \quad (17.1.4)$$

17.2 Mříž 6 (součást P1)

Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	$tl.$	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0365 m
Počet trubek	n	72
Délka trubek	l_{tr}	2,3 m
Příčná rozteč	s_1	0,25 m
Podélná rozteč	s_2	0,15 m

17.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,85 \cdot 68,57}{1 + \frac{68,57}{6901,12}} = 57,71 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (17.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 45,48 + 23,09 = 68,57 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (17.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (17.2.3)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,078}{0,0445} \cdot \left(\frac{5,54 \cdot 0,0445}{0,000096} \right)^{0,65} \cdot 0,644^{0,33}$$

$$\alpha_k = 45,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

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

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,25}{0,0445} = 5,62; \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,0445} = 3,37 \Rightarrow c_s = 1 \quad (17.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (17.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,272 \cdot 877,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{623,9}{877,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{623,9}{877,15}}$$

$$\alpha_s = 23,09 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (17.1.2)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (17.2.10)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,318} = 0,272 \quad (17.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (17.2.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (3,436 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,926 = 0,318$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plynných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (17.2.8)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,926}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{877,15}{1000} \right) \cdot 0,301 = 3,436$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (17.2.9)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,15}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,926 \text{ m}$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^p + \Delta t = 325,75 + 25 = 350,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17.2.10)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (17.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,305}{0,0365} \cdot \left(\frac{13,59 \cdot 0,0365}{566,605 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0192} \right)^{0,8} \cdot 1,174^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 6901,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota a tlak páry

$$t_{st}^p = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} = \frac{325 + 326,5}{2} = 325,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17.2.12)$$

$$p_{st}^p = \frac{p_{p,in} + p_{p,out}}{2} = \frac{10,27 + 10,23}{2} = 10,25 \text{ Mpa} \quad (17.2.13)$$

Fyzikální vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\eta = 566,605 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,305 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 1,174$$

$$\nu = 0,0192 \text{ m}^2/\text{s}$$

Rychlost proudu páry

$$w_p = \frac{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}}{f} \cdot v = \frac{55,56 - 1,528 - 0,694}{0,0753} \cdot 0,0192 = 13,59 \text{ m/s} \quad (17.2.14)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,0365^2}{4} \cdot 72 = 0,0753 \text{ m}^2 \quad (17.2.15)$$

17.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,3 \cdot 72 = 23,15 \text{ m}^2 \quad (17.2.16)$$

17.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{279,5 - 277}{\ln\left(\frac{279,5}{277}\right)} = 278,25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (17.2.17)$$

$$\Delta t_v = 606 - 326,5 = 279,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 602 - 325 = 277 \text{ }^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

17.2.4 Teplo pohlcené mříží 6

$$Q_{mriz5} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{57,71 \cdot 23,15 \cdot 278,25}{1000} = 371,76 \text{ kW} \quad (17.2.18)$$

17.3 Celková tepelná bilance oblasti mříže 6

Kontrola odchylky

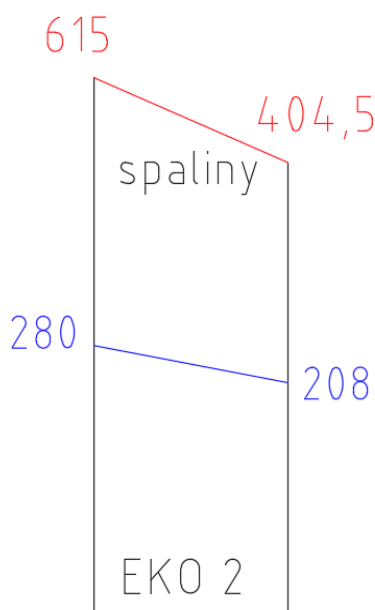
$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{373,45 - 371,75}{373,45} \cdot 100 = 0,45 \% \quad (17.3.1)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 5 %, tudíž lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

18 Oblast EKO 2

Oblast se nachází ve druhém tahu kotle. Jedinou teplosměnnou plochu zde tvoří dvoudílný ekonomizer 2. Jedná se o příčně omývaný vystřídáný dvojhad s hladkými trubkami.

Druhý tah je rozdělený do čtyř spalínových kanálů a v každém z nich se nachází dva svazky trubek. Teplota spalin není v celé oblasti EKO 2 konstantní, a proto nemůže být počítána jako jeden celek. Pro jednoduchost byla oblast rozdělena na levou a pravou část. Levá část se skládá ze dvou spalínových kanálů. Vstupní teplota spalin v každém z nich odpovídá výstupní teplotě spalin z oblasti mříže 5, tudíž lze pro zjednodušení provést jeden tepelný výpočet pro celou levou část EKA 2. To samé platí i pro pravou část EKA 2, přičemž vstupní teplota spalin odpovídá výstupní teplotě spalin z oblasti mříže 6.



Obr. 18.1 Oblast EKO 2 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

18.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (3152,77 - 2015,89) = 18999,17 \text{ kW} \quad (18.1.1)$$

- pro určení bilančního tepla spalin pro celou oblast EKO 2 byla vypočítána střední vstupní teplota spalin a střední výstupní teplota spalin z levé a pravé části a jim odpovídající entalpie spalin

Teploty spalin pro EKO 2

	Levá část EKO 2	Pravá část EKO 2
Vstupní teplota spalin [°C]	628	602
Výstupní teplota spalin [°C]	409	400

Střední vstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{628 + 602}{2} = 615 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (18.1.2)$$

Střední výstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{409 + 400}{2} = 404,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (18.1.3)$$

Střžení hodnoty spalin pro EKO 2

	<i>Teplota [°C]</i>	<i>Entalpie [kJ/kg]</i>
<i>Vstupní střední hodnoty</i>	615	3152,77
<i>Výstupní střední hodnoty</i>	404,5	2015,89

18.2 Levá část EKO 2

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	5,2 m
šířka	A	3,96 m
hloubka	B	4,22 m

Parametry EKO 2

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
Příčná rozteč	s_1	0,156 m
Podélná rozteč	s_2	0,06 m
Počet trubek v 1. řadě	n_1	12
Počet trubek ve 2. řadě	n_2	13
Počet řad	z	24
Počet paralelních trubek	n_{tr}	51
Střední délka trubky	l_{tr}	97,89 m
Efektivní délka trubky	l_e	4,01 m

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{628 + 409}{2} = 518,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (18.2.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0692 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000085 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,653$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící levou částí EKA 2 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (18.2.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{14,88} \cdot \left(1 + \frac{518,5}{273,15}\right) = 5,69 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A \cdot B - n \cdot l_e \cdot D = 3,96 \cdot 4,22 - 12 \cdot 4,01 \cdot 0,038 = 14,88 \text{ m}^2 \quad (18.2.3)$$

18.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 73,33 = 62,33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 63,53 + 9,8 = 73,33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.2.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (18.2.6)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,364 \cdot \frac{0,0692}{0,038} \cdot \left(\frac{5,69 \cdot 0,038}{0,000085} \right)^{0,6} \cdot 0,653^{0,33}$$

$$\alpha_k = 63,53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitele

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,156}{0,038} = 4,11; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,06}{0,038} = 1,58 \quad (18.2.7)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,11 - 1}{2,59 - 1} = 1,95 \quad (18.2.8)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,11^2 + 1,58^2} = 2,59 \quad (18.2.9)$$

- pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a při $\sigma_1 \geq 3$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,95^{0,1} = 0,364 \quad (18.2.10)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (18.2.11)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,162 \cdot 791,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{544,4}{791,65} \right)^{3,6}}{1 - \frac{544,4}{791,65}}$$

$$\alpha_s = 9,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalín [K] z rovnice (18.2.1)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (18.2.16)

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,177} = 0,162 \quad (18.2.12)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (18.2.13)$$

$$k \cdot p \cdot s = (7,147 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,248 = 0,177$$

- druhý sčítanec v závorce se při spalování plyných paliv neuvažuje

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (18.2.14)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301 \cdot 0,248}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{791,65}{1000} \right) \cdot 0,301 = 5,44$$

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , p_{sp} jsou dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.4) a (4.2.16)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,156 \cdot 0,06}{0,038^2} - 1 \right) = 0,248 \text{ m} \quad (18.2.15)$$

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^v + \Delta t = 246,25 + 25 = 271,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18.2.16)$$

Střední teplota vody

$$t_v^{st} = \frac{t_{v,in} + t_{v,out}}{2} = \frac{209,5 + 283}{2} = 246,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18.2.17)$$

18.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,038 \cdot 97,89 \cdot 51 = 595,99 \text{ m}^2 \quad (18.2.18)$$

18.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{345 - 199,5}{\ln\left(\frac{345}{199,5}\right)} = 265,64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18.2.19)$$

$$\Delta t_v = 628 - 283 = 345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 409 - 209,5 = 199,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

18.2.4 Teplo pohlcené levou částí EKA 2

$$Q_{EKO2,levý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{62,33 \cdot 595,99 \cdot 265,64}{1000} = 9868,86 \text{ kW} \quad (18.2.20)$$

18.3 Pravá část EKO 2

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	5,2 m
šířka	A	3,96 m
hloubka	B	4,22 m

Parametry EKO 2

- parametry jsou již uvedeny na začátku kapitoly 18.2.

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{602 + 400}{2} = 501 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18.3.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0668 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000081 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,654$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící pravou částí EKA 2 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (18.3.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{14,88} \cdot \left(1 + \frac{501}{273,15}\right) = 5,56 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A \cdot B - n \cdot l_e \cdot D = 3,96 \cdot 4,22 - 12 \cdot 4,01 \cdot 0,038 = 14,88 \text{ m}^2 \quad (18.3.3)$$

18.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 71,6 = 62,33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.3.4)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 62,35 + 9,26 = 71,6 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (18.3.6)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,364 \cdot \frac{0,0668}{0,038} \cdot \left(\frac{5,56 \cdot 0,038}{0,000081}\right)^{0,6} \cdot 0,654^{0,33}$$

$$\alpha_k = 62,35 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

- jsou stejné jako v případě levé části EKA 2

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynných paliv

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (18.3.7)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,162 \cdot 774,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{538,15}{774,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{538,15}{774,15}}$$

$$\alpha_s = 9,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- a_{st} je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu se uvažuje 0,8 [-]
- T_s je absolutní střední teplota proudu spalin [K] z rovnice (18.3.1)
- T_z je absolutní teplota zanešeného povrchu stěn [K], rovnice (18.3.8)

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy jsou stejné jako v případě levé části EKA 2. Viz rovnice (18.2.12), (18.2.13), (18.2.14) a (18.2.15).

Teplota zanešeného povrchu stěny trubek

$$t_z = t_{st}^v + \Delta t = 240 + 25 = 265 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18.3.8)$$

Střední teplota vody

$$t_v^{st} = \frac{t_{v,in} + t_{v,out}}{2} = \frac{206 + 274}{2} = 240 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18.3.9)$$

18.3.2 Výhřevná plocha

- Stejná jako v případě levé části EKA 2, rovnice (18.2.18)

18.3.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{328 - 194}{\ln\left(\frac{328}{194}\right)} = 255,16 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18.3.10)$$

$$\Delta t_v = 602 - 274 = 328 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 400 - 206 = 194 \text{ }^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

18.3.4 Teplo pohlcené pravou částí EKA 2

$$Q_{EKO2,pravy} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{60,86 \cdot 595,99 \cdot 255,16}{1000} = 9255,72 \text{ kW} \quad (18.3.11)$$

18.4 Celková tepelná bilance oblasti EKO 2

$$Q_c = Q_{EKO2,levy} + Q_{EKO2,pravy} \quad (18.4.1)$$

$$Q_c = 9868,86 + 9255,72 = 19124,58 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

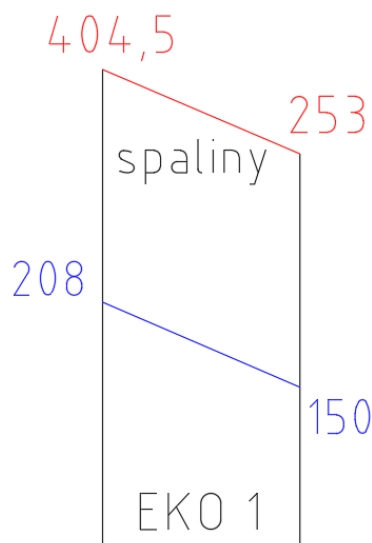
$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{18999,17 - 19124,58}{18999,17} \cdot 100 = -0,66 \% \quad (18.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

19 Oblast EKO 1

Oblast se nachází ve druhém tahu kotle. Jedinou teplosměnnou plochu zde tvoří trojdílný ekonomizer 1. Jedná se o příčně omývaný výstřídáný dvojhad s hladkými trubkami.

Výpočet bude proveden obdobným způsobem jako v případě oblasti EKO 2, tedy rozdělení na levou a pravou část. Vstupní teplota spalin pro levou část odpovídá výstupní teplotě spalin z levé části EKA 2 a pro pravou část vstupní teplota spalin odpovídá výstupní teplotě spalin z pravé části EKA 2. Střední teplota spalin je v počítané oblasti menší než 500 °C, a proto lze zanedbat přestup tepla sáláním. [1]



Obr. 19.1 Oblast EKO 1 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

19.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (2015,89 - 1359,72) = 13005,91 \text{ kW} \quad (19.1.1)$$

- pro určení bilančního tepla spalin pro celou oblast EKO 1 byla vypočítána střední vstupní teplota spalin a střední výstupní teplota spalin z levé a pravé části a jim odpovídající entalpie spalin

Teploty spalin pro EKO 1

	Levá část EKO 1	Pravá část EKO 1
Vstupní teplota spalin [°C]	409	400
Výstupní teplota spalin [°C]	255	251

Střední vstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{409 + 400}{2} = 404,5 \text{ °C} \quad (19.1.2)$$

Střední výstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{255 + 251}{2} = 253 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (19.1.3)$$

Stření hodnoty spalin pro EKO 1

	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Entalpie [kJ/kg]
Vstupní střední hodnoty	404,5	2015,89
Výstupní střední hodnoty	253	1359,72

19.2 Levá část EKO 1

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	5,43 m
šířka	A	3,3 m
hloubka	B	4,22 m

Parametry EKO 1

Vnější průměr trubky	D	0,032 m
Tloušťka stěny	t	0,004 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
Příčná rozteč	s_1	0,13 m
Podélná rozteč	s_2	0,045 m
Počet trubek v 1. řadě	n_1	12
Počet trubek ve 2. řadě	n_2	13
Počet řad	z	38
Počet paralelních trubek	n_{tr}	51
Střední délka trubky	l_{tr}	155,26 m
Efektivní délka trubky	l_e	4,01 m

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{409 + 255}{2} = 332 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (19.2.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0522 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000051 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,676$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící levou částí EKA 1 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (19.2.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{12,39} \cdot \left(1 + \frac{332}{273,15}\right) = 5,23 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A \cdot B - n \cdot l_e \cdot D = 3,3 \cdot 4,22 - 12 \cdot 4,01 \cdot 0,032 = 12,39 \text{ m}^2 \quad (19.2.3)$$

19.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 67,84 = 57,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k = 67,84 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.2.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (19.2.6)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,366 \cdot \frac{0,0522}{0,032} \cdot \left(\frac{5,23 \cdot 0,032}{0,000051}\right)^{0,6} \cdot 0,676^{0,33}$$

$$\alpha_k = 67,84 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,13}{0,032} = 4,06; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,045}{0,032} = 1,41 \quad (19.2.7)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,06 - 1}{2,47 - 1} = 2,08 \quad (19.2.8)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,06^2 + 1,41^2} = 2,47 \quad (19.2.9)$$

- pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a při $\sigma_1 \geq 3$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 2,08^{0,1} = 0,366 \quad (19.2.10)$$

Střední teplota vody

$$t_v^{st} = \frac{t_{v,in} + t_{v,out}}{2} = \frac{150 + 209,5}{2} = 179,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19.2.11)$$

19.2.2 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n = \pi \cdot 0,032 \cdot 155,26 \cdot 51 = 796,03 \text{ } m^2 \quad (19.2.12)$$

19.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{199,5 - 105}{\ln\left(\frac{199,5}{105}\right)} = 147,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19.2.13)$$

$$\Delta t_v = 409 - 209,5 = 199,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 255 - 150 = 105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

19.2.4 Teplo pohlcené levou částí EKA 1

$$Q_{EKO1,levý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{57,66 \cdot 796,03 \cdot 147,23}{1000} = 6757,81 \text{ kW} \quad (19.2.14)$$

19.3 Pravá část EKO 1

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	5,43 m
šířka	A	3,3 m
hloubka	B	4,22 m

Parametry EKO 1

- parametry jsou již uvedeny na začátku kapitoly 19.2.

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{400 + 251}{2} = 325,5 \text{ °C} \quad (19.3.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0503 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00005 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,677$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící pravou částí EKA 1 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (19.3.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{12,39} \cdot \left(1 + \frac{325,5}{273,15}\right) = 5,17 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A \cdot B - n \cdot l_e \cdot D = 3,3 \cdot 4,22 - 12 \cdot 4,01 \cdot 0,032 = 12,39 \text{ m}^2 \quad (19.3.3)$$

19.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 65,74 = 55,88 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.3.4)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k = 65,74 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při příčném proudění

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (19.3.6)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,366 \cdot \frac{0,0503}{0,032} \cdot \left(\frac{5,17 \cdot 0,032}{0,00005} \right)^{0,6} \cdot 0,677^{0,33}$$

$$\alpha_k = 65,74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

- jsou stejné jako v případě levé části EKA 1

Střední teplota vody

$$t_v^{st} = \frac{t_{v,in} + t_{v,out}}{2} = \frac{150 + 206}{2} = 178 \text{ }^\circ\text{C} \quad (19.3.7)$$

19.3.2 Výchřevná plocha

- Stejná jako v případě levé části EKA 1, rovnice (19.2.12)

19.3.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{194 - 101}{\ln\left(\frac{194}{101}\right)} = 142,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19.3.8)$$

$$\Delta t_v = 400 - 206 = 194 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 251 - 150 = 101 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- protiproudé zapojení

19.3.4 Teplo pohlcené pravou částí EKA 1

$$Q_{EKO1,pravý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{55,88 \cdot 796,03 \cdot 142,48}{1000} = 6337,44 \text{ kW} \quad (19.3.9)$$

19.4 Celková tepelná bilance oblasti EKO 1

$$Q_c = Q_{EKO1,levý} + Q_{EKO1,pravý} \quad (19.4.1)$$

$$Q_c = 6757,81 + 6337,44 = 13095,25 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

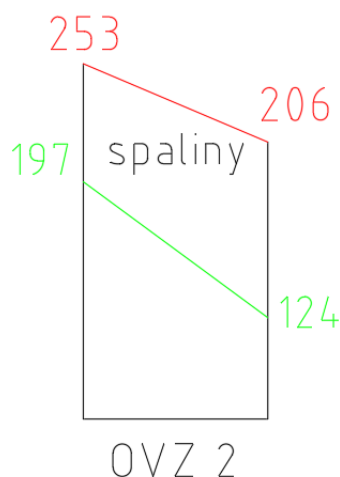
$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{13005,91 - 13095,25}{13005,91} \cdot 100 = -0,69 \% \quad (19.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

20 Oblast OVZ 2

Oblast se nachází ve druhém tahu kotle. Jedinou teplosměnnou plochu zde tvoří trubkový ohřívač vzduchu 2. Ten je tvořený jedním dílem (pro 1 spalinový kanál), který je uprostřed rozdělený přepážkou.

Výpočet bude proveden obdobným způsobem jako v případě oblasti EKO 2 a 1, tedy rozdělení na levou a pravou část. Vstupní teplota spalin pro levou část odpovídá výstupní teplotě spalin z levé části EKA 1 a pro pravou část vstupní teplota spalin odpovídá výstupní teplotě spalin z pravé části EKA 1. Střední teplota spalin je v počítané oblasti menší než 500 °C, a proto lze zanedbat přestup tepla sáláním. [1]



Obr. 20.1 Oblast OVZ 2 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

20.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (1237,64 - 1000,84) = 3957,32 \text{ kW} \quad (20.1.1)$$

- pro určení bilančního tepla spalin pro celou oblast OVZ 2 byla vypočítána střední vstupní teplota spalin a střední výstupní teplota spalin z levé a pravé části a jim odpovídající entalpie spalin

Teploty spalin pro OVZ 2

	Levá část OVZ 2	Pravá část OVZ 2
Vstupní teplota spalin [°C]	255	251
Výstupní teplota spalin [°C]	208	204

Střední vstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{255 + 251}{2} = 253 \text{ °C} \quad (20.1.2)$$

Střední výstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{208 + 204}{2} = 206 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20.1.3)$$

Stření hodnoty spalin pro OVZ 2

	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Entalpie [kJ/kg]
Vstupní střední hodnoty	253	1237,64
Výstupní střední hodnoty	206	1000,84

20.2 Levá část OVZ 2

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	3,16 m
šířka	A	3 m
hloubka	B	8,44 m

Parametry OVZ 2

Vnější průměr trubky	D	0,04 m
Tloušťka stěny	t	0,002 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,036 m
Příčná rozteč	s_1	0,056 m
Podélná rozteč	s_2	0,047 m
Počet trubek	n_{tr}	72
Počet řad	z	33
Délka trubky	l_{tr}	1,58 m
Počet vrstev	x	2

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{255 + 208}{2} = 231,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20.2.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0439 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000037 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,695$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící levou částí OVZ 2 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (20.2.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{4,84} \cdot \left(1 + \frac{231,5}{273,15}\right) = 11,16 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z \cdot 2 = \frac{\pi \cdot 0,036^2}{4} \cdot 72 \cdot 33 \cdot 2 = 4,84 \text{ m}^2 \quad (20.2.3)$$

20.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{41,22 \cdot 48,21}{41,22 + 48,21} = 18,89 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.2.4)$$

- kde ξ je součinitel využití deskového přehříváku [-], jehož hodnota byla určena z [1] a je rovna 0,85.

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k = 41,22 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.2.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (20.2.6)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0439}{0,036} \cdot \left(\frac{11,16 \cdot 0,036}{0,000037}\right)^{0,8} \cdot 0,695^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 41,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

$$\alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{vzd} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (20.2.7)$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0,34 \cdot \frac{0,0364}{0,04} \cdot \left(\frac{4,07 \cdot 0,04}{0,00003} \right)^{0,6} \cdot 0,7^{0,33}$$

$$\alpha_2 = 48,21 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,056}{0,04} = 1,4; \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,047}{0,04} = 1,18 \quad (20.2.8)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,4 - 1}{1,37 - 1} = 1,09 \quad (20.2.9)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,4^2 + 1,18^2} = 1,37 \quad (20.2.10)$$

- pro $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,09^{0,1} = 0,34 \quad (20.2.11)$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd}^{st} = \frac{t_{vzd,in} + t_{vzd,out}}{2} = \frac{123 + 198}{2} = 160,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (20.2.12)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

$$\lambda = 0,0364 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,7$$

Rychlost proudu vzduchu

$$w_{vzd} = \frac{V_{vzd}}{f} = \frac{35,77}{8,78} = 4,07 \text{ m/s} \quad (20.2.13)$$

Průtok spalovacího vzduchu

- objemový průtok vzduchu proudící levou částí OVZ 2 je poloviční

$$V_{vzd} = M_{pal} \cdot \frac{O_{VZ \min}^V}{2} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{t_{vzd}^{st}}{273,15} \right) \quad (20.2.14)$$

$$V_{vzd} = 16,802 \cdot \frac{2,438}{2} \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{160,5}{273,15} \right) = 35,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

- $O_{VZ \min}^V$ je dosazený z rovnice (2.1.3)

Průřez proudu vzduchu

$$f = l_{tr} \cdot B - n_1 \cdot D \cdot l_{tr} = 1,58 \cdot 8,44 - 72 \cdot 0,04 \cdot 1,58 = 8,78 \text{ m}^2 \quad (20.2.15)$$

20.2.2 Teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,9 \cdot 70,07 = 63,06 \text{ }^\circ\text{C} \quad (20.2.16)$$

- součinitel pro výměníky tepla s křížovým prouděním ψ [-] je určený z nomogramu [1] na základě parametru P a R

$$P = \frac{\tau_m}{\vartheta' - t'} = \frac{255 - 208}{255 - 123} = 0,36 \quad (20.2.17)$$

$$R = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{198 - 123}{255 - 208} = 1,6 \quad (20.2.18)$$

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{85 - 58}{\ln\left(\frac{85}{58}\right)} = 70,64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20.2.19)$$

$$\Delta t_v = 208 - 123 = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 255 - 197 = 58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

20.2.3 Výchřevná plocha

$$S = \pi \cdot d \cdot n_{tr} \cdot z \cdot 2 \cdot l_{tr} \cdot 2 = \pi \cdot 0,036 \cdot 72 \cdot 33 \cdot 2 \cdot 1,58 \cdot 2 = 1698,31 \text{ m}^2 \quad (20.2.20)$$

20.2.4 Teplo pohlcené levou částí OVZ 2

$$Q_{OVZ2,levý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{18,89 \cdot 1698,31 \cdot 63,06}{1000} = 2023,19 \text{ kW} \quad (20.2.21)$$

20.3 Pravá část OVZ 2

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	3,16 m
šířka	A	3 m
hloubka	B	8,44 m

Parametry OVZ 2

- parametry jsou již uvedeny na začátku kapitoly 20.2.

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{251 + 204}{2} = 227,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20.3.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0435 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000036 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,696$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící levou částí OVZ 2 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (20.3.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{4,84} \cdot \left(1 + \frac{227,5}{273,15}\right) = 11,07 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

- je stejný jako v případě levé části OVZ 2, rovnice (20.2.3)

20.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{41,11 \cdot 48,26}{41,11 + 48,26} = 18,87 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.3.3)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k = 41,11 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.3.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (20.3.5)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0439}{0,036} \cdot \left(\frac{11,07 \cdot 0,036}{0,000036}\right)^{0,8} \cdot 0,696^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 41,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

$$\alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{vzd} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (20.3.6)$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0,34 \cdot \frac{0,0365}{0,04} \cdot \left(\frac{4,08 \cdot 0,04}{0,00003} \right)^{0,6} \cdot 0,7^{0,33}$$

$$\alpha_2 = 48,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

- jsou stejné jako v případě levé části OVZ 2

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd}^{st} = \frac{t_{vzd,in} + t_{vzd,out}}{2} = \frac{125 + 196}{2} = 160,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20.3.7)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

$$\lambda = 0,0365 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,7$$

Rychlost proudu vzduchu

$$w_{vzd} = \frac{V_{vzd}}{f} = \frac{35,78}{8,78} = 4,07 \text{ m/s} \quad (20.3.8)$$

Průtok spalovacího vzduchu

- objemový průtok vzduchu proudící levou částí OVZ 2 je poloviční

$$V_{vzd} = M_{pal} \cdot \frac{O_{VZ min}^V}{2} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{t_{vzd}^{st}}{273,15} \right) \quad (20.3.9)$$

$$V_{vzd} = 16,802 \cdot \frac{2,438}{2} \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{161}{273,15} \right) = 35,78 \text{ m}^3/\text{s}$$

Průřez proudu vzduchu

- je stejný jako v případě levé části OVZ 2

20.3.2 Teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,9 \cdot 65,71 = 59,65 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20.3.10)$$

- součinitel pro výměníky tepla s křížovým prouděním ψ [-] je přibližně stejný jako v případě levé části OVZ 2

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{79 - 55}{\ln\left(\frac{79}{55}\right)} = 59,65 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20.3.11)$$

$$\Delta t_v = 204 - 125 = 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = 251 - 196 = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

20.3.3 Výhřevná plocha

- je stejná jako v případě levé části OVZ 2

20.3.4 Teplo pohlcené pravou částí OVZ 2

$$Q_{OVZ2,pravý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{18,87 \cdot 1698,31 \cdot 59,65}{1000} = 1911,16 \text{ kW} \quad (20.3.12)$$

20.4 Celková tepelná bilance oblasti OVZ 2

$$Q_c = Q_{OVZ2,levý} + Q_{OVZ2,pravý} \quad (20.4.1)$$

$$Q_c = 2023,19 + 1911,16 = 3934,34 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

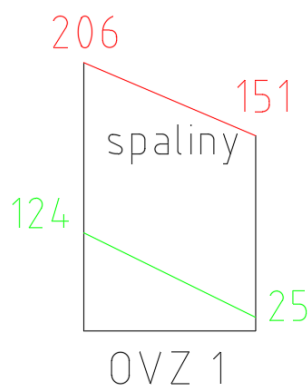
$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3957,32 - 3934,34}{3957,32} \cdot 100 = 0,58 \% \quad (20.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalin považovat za správnou.

21 Oblast OVZ 1

Oblast se nachází ve druhém tahu kotle. Jedinou teplosměnnou plochu zde tvoří trubkový ohřívač vzduchu 1. Ten je tvořený jedním dílem (pro 1 spalínový kanál), který je uprostřed rozdělený přepážkou.

Výpočet bude proveden obdobným způsobem jako v případě oblasti OVZ 2, tedy rozdělení na levou a pravou část. Vstupní teplota spalin pro levou část odpovídá výstupní teplotě spalin z levé části OVZ 2 a pro pravou část vstupní teplota spalin odpovídá výstupní teplotě spalin z pravé části OVZ 2. Střední teplota spalin je v počítané oblasti menší než 500 °C, a proto lze zanedbat přestup tepla sáláním. [1]



Obr. 21.1 Oblast OVZ 1 (uvedené číselné hodnoty jsou v °C)

21.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (1000,84 - 730,01) = 4525,96 \text{ kW} \quad (21.1.1)$$

- pro určení bilančního tepla spalin pro celou oblast OVZ 1 byla vypočítána střední vstupní teplota spalin a střední výstupní teplota spalin z levé a pravé části a jim odpovídající entalpie spalin

Teploty spalin pro OVZ 1

	Levá část OVZ 1	Pravá část OVZ 1
Vstupní teplota spalin [°C]	208	204
Výstupní teplota spalin [°C]	152	150

Střední vstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{208 + 204}{2} = 206 \text{ °C} \quad (21.1.2)$$

Střední výstupní teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{152 + 150}{2} = 151 \text{ °C} \quad (21.1.3)$$

Stření hodnoty spalin pro OVZ 1

	Teplota [°C]	Entalpie [kJ/kg]
Vstupní střední hodnoty	206	1000,84
Výstupní střední hodnoty	151	730,01

21.2 Levá část OVZ 1

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	3,16 m
šířka	A	3 m
hloubka	B	8,44 m

Parametry OVZ 1

Vnější průměr trubky	D	0,05 m
Tloušťka stěny	t	0,002 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,046 m
Příčná rozteč	s_1	0,077 m
Podélná rozteč	s_2	0,066 m
Počet trubek	n_{tr}	65
Počet řad	z	24
Délka trubky	l_{tr}	1,58 m
Počet vrstev	x	2

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{208 + 152}{2} = 180 \text{ °C} \quad (21.2.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,0412 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,706$$

Rychlost spalín

- objemový průtok spalín proudící levou částí OVZ 1 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (21.2.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{5,19} \cdot \left(1 + \frac{180}{273,15}\right) = 9,35 \text{ m/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_{sp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z \cdot 2 = \frac{\pi \cdot 0,046^2}{4} \cdot 65 \cdot 24 \cdot 2 = 5,19 \text{ m}^2 \quad (21.2.3)$$

21.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{37,48 \cdot 41,62}{37,48 + 41,62} = 16,76 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.2.4)$$

- kde ξ je součinitel využití deskového přehřívačku [-], jehož hodnota byla určena z [1] a je rovna 0,85.

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k = 37,48 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.2.5)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (21.2.6)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0412}{0,046} \cdot \left(\frac{9,35 \cdot 0,046}{0,00003}\right)^{0,8} \cdot 0,706^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 37,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

$$\alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{vzd} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (21.2.7)$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0,34 \cdot \frac{0,03}{0,05} \cdot \left(\frac{3,49 \cdot 0,05}{0,00002} \right)^{0,6} \cdot 0,7^{0,33}$$

$$\alpha_2 = 41,62 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

$$z \geq 10 \rightarrow c_z = 1$$

Poměrná příčná rozteč a poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,077}{0,05} = 1,54; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,066}{0,05} = 1,32 \quad (21.2.8)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,54 - 1}{1,37 - 1} = 1,02 \quad (21.2.9)$$

- kde σ'_2 je poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,54^2 + 1,32^2} = 1,53 \quad (21.2.10)$$

- pro $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$ platí:

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,02^{0,1} = 0,34 \quad (21.2.11)$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd}^{st} = \frac{t_{vzd,in} + t_{vzd,out}}{2} = \frac{25 + 123}{2} = 74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21.2.12)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

$$\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00002 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,7$$

Rychlost proudu vzduchu

$$w_{vzd} = \frac{V_{vzd}}{f} = \frac{28,63}{8,2} = 3,49 \text{ m/s} \quad (21.2.13)$$

Průtok spalovacího vzduchu

- objemový průtok vzduchu proudící levou částí OVZ 1 je poloviční

$$V_{vzd} = M_{pal} \cdot \frac{O_{VZ\ min}^V}{2} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{t_{vzd}^{st}}{273,15}\right) \quad (21.2.14)$$

$$V_{vzd} = 16,802 \cdot \frac{2,438}{2} \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{74}{273,15}\right) = 28,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

- $O_{VZ\ min}^V$ je dosažený z rovnice (2.1.3)

Průřez proudu vzduchu

$$f = l_{tr} \cdot B - n_1 \cdot D \cdot l_{tr} = 1,58 \cdot 8,44 - 65 \cdot 0,05 \cdot 1,58 = 8,2 \text{ m}^2 \quad (21.2.15)$$

21.2.2 Teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,93 \cdot 104,6 = 97,28 \text{ }^\circ\text{C} \quad (21.2.16)$$

- součinitel pro výměníky tepla s křížovým prouděním ψ [-] je určený z nomogramu [1] na základě parametru P a R

$$P = \frac{\tau_m}{\vartheta' - t'} = \frac{208 - 152}{208 - 25} = 0,31 \quad (21.2.17)$$

$$R = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{123 - 25}{208 - 152} = 1,75 \quad (21.2.18)$$

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{127 - 85}{\ln\left(\frac{127}{85}\right)} = 104,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (21.2.19)$$

$$\Delta t_v = 152 - 25 = 127 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 208 - 123 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$$

21.2.3 Výchřevná plocha

$$S = \pi \cdot d \cdot n_{tr} \cdot z \cdot 2 \cdot l_{tr} \cdot 2 = \pi \cdot 0,046 \cdot 65 \cdot 24 \cdot 2 \cdot 1,58 \cdot 2 = 1424,79 \text{ m}^2 \quad (21.2.20)$$

21.2.4 Teplo pohlcené levou částí OVZ 1

$$Q_{OVZ1,levý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{16,76 \cdot 1424,79 \cdot 97,28}{1000} = 2323,33 \text{ kW} \quad (21.2.21)$$

21.3 Pravá část OVZ 1

Rozměry kanálu z výkresové dokumentace

výška	H	3,16 m
šířka	A	3 m
hloubka	B	8,44 m

Parametry OVZ 1

- parametry jsou již uvedeny na začátku kapitoly 21.2.

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{204 + 150}{2} = 177 \text{ °C} \quad (21.3.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin

$$\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,707$$

Rychlost spalin

- objemový průtok spalin proudící pravou částí OVZ 1 je poloviční.

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{2}\right)}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15}\right) \quad (21.3.2)$$

$$w_{sp} = \frac{\left(\frac{16,802 \cdot 3,478}{2}\right)}{5,19} \cdot \left(1 + \frac{227,5}{273,15}\right) = 9,29 \text{ m/s}$$

Světly průřez pro spaliny

- je stejný jako v případě levé části OVZ 1, rovnice (21.2.3)

21.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{36,53 \cdot 41,68}{36,53 + 41,68} = 16,55 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.3.3)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k = 36,53 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.3.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (21.3.5)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,04}{0,046} \cdot \left(\frac{9,29 \cdot 0,046}{0,00003}\right)^{0,8} \cdot 0,707^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 36,53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

$$\alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{vzd} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (21.3.6)$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0,34 \cdot \frac{0,03}{0,05} \cdot \left(\frac{3,5 \cdot 0,05}{0,00002}\right)^{0,6} \cdot 0,7^{0,33}$$

$$\alpha_2 = 41,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korekční součinitelé

- jsou stejné jako v případě levé části OVZ 1

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd}^{st} = \frac{t_{vzd,in} + t_{vzd,out}}{2} = \frac{25 + 123}{2} = 74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21.3.7)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

$$\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00002 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,7$$

Rychlost proudu vzduchu

$$w_{vzd} = \frac{V_{vzd}}{f} = \frac{28,633}{8,2} = 3,49 \text{ m/s} \quad (21.3.8)$$

Průtok spalovacího vzduchu

- objemový průtok vzduchu proudící pravou částí OVZ 1 je poloviční

$$V_{vzd} = M_{pal} \cdot \frac{O_{VZ}^V}{2} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{t_{vzd}^{st}}{273,15}\right) \quad (21.3.9)$$

$$V_{vzd} = 16,802 \cdot \frac{2,438}{2} \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{74}{273,15}\right) = 28,633 \text{ m}^3/\text{s}$$

Průřez proudu vzduchu

- je stejný jako v případě levé části OVZ 1

21.3.2 Teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,93 \cdot 101,41 = 94,32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21.3.10)$$

- součinitel pro výměníky tepla s křížovým prouděním ψ [-] je přibližně stejný jako v případě levé části OVZ 1

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{125 - 81}{\ln\left(\frac{125}{81}\right)} = 101,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21.3.11)$$

$$\Delta t_v = 150 - 25 = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 204 - 123 = 81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

21.3.3 Výhřevná plocha

- je stejná jako v případě levé části OVZ 1

21.3.4 Teplo pohlcené pravou částí OVZ 1

$$Q_{OVZ1,pravý} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{16,54 \cdot 1424,79 \cdot 94,32}{1000} = 2222,3 \text{ kW} \quad (21.3.12)$$

21.4 Celková tepelná bilance oblasti OVZ 1

$$Q_c = Q_{OVZ1,levý} + Q_{OVZ1,pravý} \quad (21.4.1)$$

$$Q_c = 2299,29 + 2222,3 = 4521,59 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{4525,96 - 4521,59}{4525,96} \cdot 100 = 0,1 \text{ \%} \quad (21.4.2)$$

Vypočítaná odchylka nepřesahuje toleranční pásmo 2 %, a tak lze výstupní teplotu spalín považovat za správnou.

$$\Delta Q_{celk} = \frac{Q_P^p \cdot \eta_k \cdot M_{pal}}{100} - \sum Q_i = 155752,44 - 155776,21 = -23,77$$

22 Celková bilance kotle

Provádí se na straně spalin a odchylka by neměla být vyšší než 0,5 %. [1]

$$\Delta Q_{celk} = \frac{Q_p^p \cdot \eta_k \cdot M_{pal}}{100} - \sum Q_i = 155752,44 - 155776,21 = -23,77 \text{ kW} \quad (21.4.2)$$

Teplo odevzdané v jednotlivých teplosměnných plochách na straně spalin

$$\sum Q_i = \varphi \cdot M_{pal} \cdot (I_u - I_{EK01}) \quad (21.4.2)$$

$$\sum Q_i = 0,995 \cdot 16,802 \cdot (10677,76 - 1359,72) = -0,24 \%$$

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést přepočít uhelného kotle na plynné palivo, návrh úprav spalovací komory a provést tepelný přepočít s novým palivem. Stávajícím palivem bylo černé uhlí se spoluspalováním koksárenského a vysokopecního plynu. Složení stávajícího paliva nebylo známo, tudíž nemůže být provedeno porovnání s novou směsí.

Jako první byly určeny stechiometrické výpočty, na které navazuje výpočet tepelné bilance a dále účinnost kotle (92,8 %). Výrobní teplo páry je 155,75 MW a k tomu je zapotřebí 16,8 m³ paliva za sekundu. Parametry páry i parní výkon jsou zachovány, tudíž vyhovují hlavnímu požadavku.

Při výpočtu kotle se vycházelo z původní výkresové dokumentace kotle a informací od konzultanta. Všechny parametry kotle zůstaly zachovány. Došlo pouze k úpravě spalovací komory. Na místo stávajících práškových hořáků byly umístěny celkově 4 nové plynové hořáky a 2 stávající plynové hořáky byly ponechány. Po těchto úpravách bylo dosaženo teploty na konci ohniště 1147 °C.

Samotný tepelný přepočít je poměrně obsáhlý z důvodu velkého množství paralelních výhřevných ploch. Kotel byl rozdělen na několik pomyslných oblastí, přičemž na konci každé z nich byla provedena kontrola na volenou odchozí teplotu spalin, která dále sloužila jako vstupní hodnota do následující oblasti. Každá odchozí teplota spalin splnila podmínky pro toleranční pásmo. Pro přehříváky je to 2 % povolené odchylky a pro mříže 5 %. Celý výpočet je proveden za předpokladu kompletního vyčištění spalinového kanálu a teplosměnných ploch po spalování předchozího paliva.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0426-4.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [3] Software Microsoft Office Excel 2007
- [4] Software XSteam – IAPWS IF97 Excel Steam Tables by Magnus Holmgren, www.xeng.com
- [5] www.mzp.cz [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Název
A, B, H, E	m	Rozměry spalínového kanálu
a	-	Stupeň černosti proudu spalín
a_0	-	Stupeň černosti ohniště
a_{NS}	-	Stupeň černosti nesvítivé části plamene
a_{pl}	-	Stupeň černosti plamene
a_{st}	-	Stupeň černosti povrchu stěn
a_{sv}	-	Stupeň černosti svítivé části plamene
Bo	-	Boltzmanovo číslo
c_s	-	Opravný součinitel na uspořádání svazku
c_z	-	Opravný součinitel na počet řad svazku
D	m	Vnější průměr trubky
d	m	Vnitřní průměr trubky
d_e	m	Ekvivalentní průměr
f	m ²	Průřez pro páru, vodu
f	-	Součinitel vlhkosti vzduchu
F_{sp}, F_1, F_2	m ²	Světlý průřez spalínového kanálu
$F_{ús}$	m ²	Účinná sálavá plocha
F_{st}	m ²	Povrch stěn
$F_{hoř}$	m ²	Plocha hořáků
$F_{průlezy}$	m ²	Plocha průlezů
h_k	m	Výška hořáku
h_c	m	Výška ohniště
i_{in}	kJ/kg	Entalpie média na vstupu
i_{out}	kJ/kg	Entalpie média na výstupu
i_{NV}	kJ·kg ⁻¹	Entalpie napájecí vody
i_{pp}	kJ·kg ⁻¹	Entalpie páry
I_0	kJ·Nm ⁻³	Entalpie spalín na konci ohniště
I_1	kJ·Nm ⁻³	Vstupní entalpie spalín
I_2	kJ·Nm ⁻³	Výstupní entalpie spalín
I_u	kJ·Nm ⁻³	Užitečné teplo uvolněné v ohništi
I_{SP}	kJ·Nm ⁻³	Entalpie spalín
$I_{SP min}$	kJ·Nm ⁻³	Entalpie minimálního objemu spalín
I_{VZ}	kJ·Nm ⁻³	Entalpie vzduchu
$I_{VZ min}$	KJ·Nm ⁻³	Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu
k	W·m ⁻² ·K ⁻¹	Součinitel prostupu tepla
$\bar{k}$	W·m ⁻² ·K ⁻¹	Střední součinitel prostupu tepla
$k \cdot p \cdot s$	-	Optická hustota spalín
$k_s \cdot r_{sp}$	-	Součinitel zeslabení sálání
l_{tr}	m	Délka trubky
M	-	Součinitel respektující průběh teplot v ohništi
M_{pal}, M_{PV}	Nm ³ ·s ⁻¹	Množství paliva
M_{pp}	kg·s ⁻¹	Množství přehřáté páry

M_{nv}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Množství napájecí vody
M_o	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Množství odluhu
M_{op}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Množství odběru páry
M_{mp}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Množství páry do mezipříváku
M_v	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Množství vstříku
n_{tr}	-	Počet trubek
n_1, n_2	-	Počet hořáků
O	m	Obvod průřezu kanálu
O_x	Nm^3/Nm^3	Objem určité složky spalín
$O_{H_2O}^V$	Nm^3/Nm^3	Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu
$O_{SP\ min}^S$	Nm^3/Nm^3	Minimální objem suchých spalín
$O_{SP\ min}^V$	Nm^3/Nm^3	Minimální objem vlhkých spalín spalín
O_{SP}	Nm^3/Nm^3	Skutečný objem vlhkých spalín
O_{VZ}	Nm^3/Nm^3	Skutečný objem vlhkého vzduchu
p	MPa	Tlak
p_{nv}	MPa	Tlak napájecí vody
Pr	-	Prandtlův číslo
p_{sp}	MPa	Parciální tlak tříatomových plynů
Q_b	kW	Bilanční teplo
Q_c	kW	Teplo odevzdané teplosměnným plochám
Q_P^p	kW	Teplo přivedené do kotle
Q_i^r	$\text{kJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Výhřevnost paliva
Q_{vz}	$\text{kJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$	Teplo přivedené vzduchem
q	$\text{kW}\cdot\text{m}^3$	Střední tepelné zatížení stěn ohniště
q_v	$\text{kW}\cdot\text{m}^3$	Objemové zatížení ohniště
r	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Měrná plynová konstanta
r_{H_2O}	-	Objemová část vodní páry
r_{RO_2}	-	Objemová část tříatomových plynů
r_{sp}	-	Součet objemových částí tříatomových plynů
s	m	Efektivní tloušťka sálové vrstvy
S	m^2	Výhřevná plocha
s_1	m	Příčná rozteč
s_2	m	Podélná rozteč
t	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
t_{in}	$^{\circ}\text{C}$	Vstupní teplota média
t_{in}	$^{\circ}\text{C}$	Výstupní teplota média
t_{st}^p	$^{\circ}\text{C}$	Střední teplota páry
t_{st}^v	$^{\circ}\text{C}$	Střední teplota vody
t_{st}^{vzd}	$^{\circ}\text{C}$	Střední teplota vzduchu
t_z	$^{\circ}\text{C}$	Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách
t	m	Tloušťka stěny trubky
t_{np}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota nechlazeného plamene
t_{ok}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota na konci ohniště
t_s	$^{\circ}\text{C}$	Střední teplota spalín
t_{st}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota stěny listů

V_o	m^3	Objem spalovací komory
V_S	Nm^3	Průtok spalín
w_S	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost spalín
w_V	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vzduchu
x	$kg \cdot kg_{ss}^{-1}$	Měrná vlhkost
z_1	-	Počet příčných řad
z_2	-	Počet podélných řad
Z_{CO}	%	Ztráta chemickým nedopalem
Z_k	%	Komínová ztráta
Z_r	%	Nepočitatelná ztráta
Z_{sv}	%	Ztráta sdílením tepla do okolí
α	-	Součinitel přebytku vzduchu
α_K	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla konvekci
α_S	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Celkový součinitel přestupu tepla
α_{sal}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla sáláním
β_{OVZ}	-	Součinitel přebytku vzduchu
Δt_{ln}	$^{\circ}C$	Střední logaritmický teplotní spád
Δt_m	$^{\circ}C$	Menší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku
Δt_v	$^{\circ}C$	Větší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku
ε	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Součinitel zanesení plochy
ξ	-	Součinitel využití
η_k	%	Tepelná účinnost kotle
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
φ	%	Relativní vlhkost
ψ	-	Součinitel tepelné efektivnosti
ω	-	Součinitel omývání plochy
σ_1	-	Poměrná přímá rozteč
σ_2	-	Poměrná podélná rozteč

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Výkres kotle