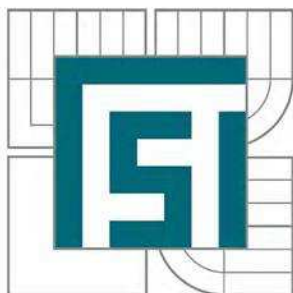


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NAVRHNĚTE ŘEŠENÍ SPALOVÁNÍ S VYSOKOU
ÚČINNOSTÍ A NÍZKOU EMISÍ NOX PRO
GRANULAČNÍ PARNÍ KOTEL, 130 T/H, S PARAMETRY
PÁRY 13,6 MPA, 540°C

THE PROPOSAL OF MEASURES FOR HIGH EFFICIENCY BURNING AND LOWERING OF NOX
EMISSIONS FOR BOILER 130 T/H, 13,9 MPA, 540°C

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN BURÝŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Burýšek

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

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

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

Navrhňte řešení spalování s vysokou účinností a nízkou emisí NO_x pro granulační parní kotel,130 t/h,s parametry páry 13,6 MPa,540°C

v anglickém jazyce:

The proposal of measures for high efficiency burning and lowering of NO_x emissions for boiler 130 t/h,13,9 MPa,540°C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě tepelného výpočtu navrhňte opatření ke snížení emisí NO_x.

Cíle diplomové práce:

proved'te tepelný výpočet,dimenzování výhřevných ploch a jejich řazení v kotli

Seznam odborné literatury:

černý, Janeba, Teysler: Parní kotle, technický průvodce, SNTL Praha 1992,
Budaj, F.: Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT v Brně

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 26.11.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kontrolním výpočtem parního kotle. Práce je rozdělena na několik částí. V jednotlivých částech jsou provedeny výpočty stechiometrie, entalpie spalin a výkony jednotlivých teplosměnných ploch. Na základě výsledků je navrženo umístění SCR.

Abstract

This thesis concerns with control calculation of steam boiler. The work is divided into several parts. In the individual parts are executed stoichiometry calculations, the enthalpy of flue gas and power of the heat exchange surfaces. Based on the results it is proposed location of the SCR.

Klíčová slova

Denitrifikace, Tepelný výpočet, Granulační kotel

Keywords

Denitrification, Thermal calculation, Dry bottom furnace

Bibliografická citace

BURÝŠEK, J. Navrhňte řešení spalování s vysokou účinností a nízkou emisí NO_x pro granulační parní kotel, 130 t/h,s parametry páry 13,6 MPa, 540°C. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 114 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

V Brně dne 20. května 2014

.....
podpis autora

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě během celého studia podporovali. Dále pak konzultantovi panu Ing. Jaroslavu Studničkovi ze společnosti PROVYKO za poskytnutí podkladů, cenné odborné rady a hlavně za jeho čas, který mi věnoval. V neposlední řadě vedoucímu práce panu doc. Ing. Zdenku Skálovi, CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Poděkování také patří mé přítelkyni, která mi pomohla s gramatickou stránkou této práce.

Obsah

1 Úvod.....	16
2 Doplnění zadání	17
3 Objemy a entalpie vzduchu a spalin	19
3.1 Rozbor paliva.....	19
3.2 Stechiometrie	19
3.3 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin.....	21
3.4 Entalpie vzduchu a produktů spalování	21
3.5. Entalpie spalin při recirkulaci	22
4 Tepelná bilance kotle	24
4.1 Teplo přivedené do kotle	24
4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	24
4.3 Tepelná účinnost kotle	25
4.4 Výrobní teplo páry	25
4.5 Množství paliva.....	25
5 Výpočet spalovací komory	26
5.1 Tepelný výpočet ohniště	26
6 Bilance výpočtu	30
7 Oblast deskového přehříváku.....	31
7.1 Bilanční teplo spalin	31
7.2 Deskový přehřívák	31
7.3 Stěny výparníku v oblasti deskového přehříváku	35
7.4 Strop nad oblastí deskového přehříváku	37
7.5 Celková bilance oblasti deskového přehříváku	39
8 Oblast protiproudého přehříváku	40
8.1 Bilanční teplo spalin	40
8.2 Protiproudý přehřívák	41
8.3 Stěny výparníku v oblasti protiproudého přehříváku	44
8.4 Strop nad oblastí protiproudého přehříváku	46
8.5 Celková bilance oblasti protiproudého přehříváku	47
9 Oblast souprroudého přehříváku	48
9.1 Bilanční teplo spalin	48
9.2 Souprroudý přehřívák.....	49
9.3 Stěny výparníku v oblasti souprroudého přehříváku	52
8.4 Strop nad oblastí souprroudého přehříváku	54

9.5 Celková bilance oblasti souproudeho přehříváku.....	55
10 Oblast výparníkové mříže.....	56
10.1 Bilanční teplo spalin	56
10.2 Mříž výparníku	57
10.3 Spodní stěna výparníku v oblasti výparníkové mříže.....	59
10.4 Strop a stěny v oblasti výparníkové mříže.....	60
10.5 Celková bilance oblasti výparníkové mříže.....	62
11 Oblast přehřívákové mříže.....	63
11.1 Bilanční teplo spalin	63
11.2 Mříž přehříváku	63
11.3 Celková bilance oblasti přehřívákové mříže.....	66
12 Oblast vratné komory	67
12.1 Bilanční teplo spalin	67
12.2 Vratná komora	67
12.3 Celková bilance oblasti vratné komory	69
13 Oblast horního ležatého přehříváku.....	70
13.1 Bilanční teplo spalin	70
13.2 Ležatý přehřívák	71
13.3 Stěny druhého tahu v oblasti horního ležatého přehříváku	74
13.4 Celková bilance oblasti horního ležatého přehříváku.....	75
14 Oblast dolního ležatého přehříváku	77
14.1 Bilanční teplo spalin	77
14.2 Ležatý přehřívák	78
14.3 Stěny druhého tahu v oblasti dolního ležatého přehříváku.....	81
14.4 Celková bilance oblasti dolního ležatého přehříváku	82
15 Oblast ekonomizéru 2	84
15.1 Bilanční teplo spalin	84
15.2 EKO 2	85
15.3 Celková bilance ekonomizéru 2.....	87
16 Oblast ekonomizéru 1	88
16.1 Bilanční teplo spalin	88
16.2 EKO 1	89
16.3 Celková bilance ekonomizéru 1	91
17 Bilance ohříváků vzduchu	92
18 Oblast LUVO P.....	93
18.1 Bilanční teplo spalin	93
18.2 LUVO P.....	93

18.3 Celková bilance LUVO P	96
19 Oblast LUVO 3	97
19.1 Bilanční teplo spalin	97
19.2 LUVO 3	97
19.3 Celková bilance LUVO 3	100
20 Oblast LUVO 2	101
20.1 Bilanční teplo spalin	101
20.2 LUVO 2	101
20.3 Celková bilance LUVO 2	104
21 Oblast LUVO 1	105
21.1 Bilanční teplo spalin	105
21.2 LUVO 1	105
21.3 Celková bilance LUVO 1	108
22 Celková bilance kotle.....	109
23 Závěr	110
Seznam použitých zdrojů.....	111
Seznam použitých symbolů	111
Seznam použitých zkratek	114
Seznam příloh	114

1 Úvod

Celosvětovým trendem dnešní doby je ekologický způsob života. Naším cílem je ochrana životního prostředí, tak aby co nejméně docházelo k jeho znečišťování. K tomu ve velké míře přispívá průmyslová výroba. Při spalování fosilních paliv dochází k produkci emisí, které mimo jiné obsahují i oxidy dusíku – NO_x . Ty jsou považovány za hlavní látky znečišťující ovzduší. Oxidy dusíku jsou ve velké míře produkovány spalováním uhlí v uhelných elektrárnách.

Označením NO_x rozumíme převážně oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Podle vzniku rozeznáváme tři typy NO_x , a to palivové, termické a promptní. Na znečištění ovzduší se nejvíce projevuje podíl NO_x termických, které vznikají převážně při spalování uhlí v uhelných elektrárnách. Jejich vznik je závislý na výšce teploty, na době po kterou je teplota udržována a na množství dusíku.

Tato diplomová práce vychází z požadavku evropské směrnice, která od roku 2016 nařizuje snížení produkce NO_x u zdrojů velkých výkonů a stanovuje emisní limit pro NO_x na 200 mg/Nm^3 .

Řešení problému práce spočívá v provedení kontrolního výpočtu granulačního parního kotle o výkonu 130 t/h, 13,6 MPa a 540°C a návrhu metody selektivní katalytické redukce (SCR). Metoda, která je zde navržena a použita, je jednou z možností sekundárního snižování NO_x . Pro správnou funkci tohoto řešení je důležité jeho umístění ve spalínovodu. Ideální podmínky pro dosažení vysoké účinnosti je teplotní pole $400\text{--}310^\circ\text{C}$. Pokud je SCR umístěna mimo toto teplotní pole, účinnost denitrifikace klesá a dále vznikají další provozní komplikace. Při umístění ve vyšších teplotách z SO_2 vzniká SO_3 , což způsobuje problémy na zařízení za katalyzátorem. Naopak při umístění v nižších teplotách může docházet k špatnému reagování a ucpávání kanálů katalyzátoru.

Při všech výpočtech, pokud není uvedeno jinak, je použito postupů, rovnic a hodnot z publikace Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet [1]. Samotný výpočet je realizován prostřednictvím programu Microsoft Office Excel [3] s podporou programu XSteam[4].

Princip SCR spočívá v reakci NO_x s redukčním činidlem (nejčastěji amoniak), který vytváří molekulární dusík a vodu. Při rozkladu NO_x se mohou vyskytovat jak reakce žádoucí, tak ale i reakce nežádoucí. Žádoucí reakce obsah NO_x snižují. Nežádoucí reakce obsah NO_x naopak zvyšují, nebo snižují množství redukčního činidla potřebného pro žádoucí reakce. Za vhodných provozních podmínek SCR dosahuje vysoké redukce oxidů dusíku. Je to 80 - 90 % a u novějších technologií se setkáváme i s účinností vyšší než 90 %.

2 Doplnění zadání

Denitrifikace kotle PK4N – Teplárna Košice

Stávající granulační kotel parního výkonu 130 t/h s parametry přehřáté páry na výstupu 13,6 MPa; 540 °C spalující černé uhlí dosahuje po primární a sekundární metodě (SNCR) vysoké hodnoty NO_x při současném plnění přijatelných nedopalů.

Navrhněte řešení pro dosahování optimálních hodnot nedopalů (vyšší účinnost kotle). Následně navrhněte vhodné řešení denitrifikace kotle pomocí sekundární metody tak, aby byl plněn emisní limit koncentrace NO_x pod 200 mg/Nm^3 v odchozích spalinách. Navržená sekundární metoda bude současně plnit i další hygienické předpisy včetně popelovin, jež budou použity pro další průmyslové účely.

Proveďte tepelný výpočet kotle a na základě navržené sekundární metody proveďte potřebné úpravy na kotli pro její aplikaci. Pro provedení výpočtu obdržíte potřebné výkresy, data, konstrukční údaje a popis kotle.

Výkonový rozsah kotle je 40 – 105 %. Krátkodobá žádaná přetížitelnost kotle o 5 % se předpokládá max.2h/za24hod. Stabilizačním palivem pro výkony pod 60 % zatížení kotle se používá zemní plyn.

Současné hodnoty emisí bez sekundární metody:

Vstupní hodnota NO_x (6% O_2)	750 mg/Nm^3
Nedopal ve strusce:	5 %
Nedopal v popílku:	3 %
Vstupní hodnota NO_x (6% O_2)	440 mg/Nm^3
Nedopal ve strusce:	12 %
Nedopal v popílku:	5 %

Žádané hodnoty pro plnění díla v odchozích spalinách:

Koncentrace NO_x (6% O_2)	200 mg/Nm^3
Čpavkový skluz	5 mg/Nm^3
Amonné soli v popílku	100 ppm

Základní parametry kotle:

Jmenovitý parní výkon	130 t/h
Minimální parní výkon bez stabilizace	78 t/h
Jmenovitý tlak páry	13,64 MPa
Jmenovitá teplota páry za přehřívákem	540 °C
Jmenovitá teplota napájecí vody	230 °C
Teplota napájecí vody – minimální	170 °C

Zadání palivové základny – černé uhlí:

		PROJEKČNÉ UHLIE		
		Garantované uhlie	uhlie s najlepšou výhrevnosťou	uhlie s najhoršou výhrevnosťou
Voda W^r	[%]	15	12	14
Popolovina A^d	[%]	11	15	22
Síra S^d	[%]	0,5	0,2	0,4
Uhlík C^{daf}	[%]	79,13	79,00	77,90
Vodík H^{daf}	[%]	5,01	5,60	5,70
Dusík N^{daf}	[%]	1,27	2,09	1,41
		max 2,5		
Kyslík O^{daf}	[%]	14,04	12,36	13,79
Prchavá horľavina V^{daf}	[%]	40	45	43
Dolná výhrevnosť	[kcal/kg]	5 400	5 500	4 900
	[kJ/kg]	22 608,7	23 027,4	20 515,3
Meliteľnosť	[°HGI]	48 ÷ 60		
Zrinitosť uhlia	[mm]	0 ÷ 10; 0 ÷ 20		

Zadání palivové základny – zemní plyn:

Výhrevnosť		34,30 MJ/Nm ³
Složení	CH ₄	94,31 %obj.
	C ₂ H ₆	0,51 %obj.
	C ₃ H ₈	0,11 %obj.
	C ₄ H ₁₀	0,10 %obj.
	CO ₂	3,38 %obj.
	N ₂	1,59 %obj.

3 Objemy a entalpie vzduchu a spalin

3.1 Rozbor paliva

Voda	W^r	15%		
Popelovina	A^d	11%	A^r	9,35%
Síra	S^d	0,50%	S^r	0,425%
Uhlík	C^{daf}	79,13%	C^r	59,86%
Vodík	H^{daf}	5,01%	H^r	3,79%
Dusík	N^{daf}	1,27%	N^r	0,96%
Kyslík	O^{daf}	14,04%	O^r	10,62%
Prchlavá hořlavina	V^{daf}	40%	V^r	30,26%

Tab. 3.1

3.2 Stechiometrie

Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg uhlí

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (3.1)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \left(\frac{59,86}{12,01} + \frac{3,79}{4,032} + \frac{0,425}{32,06} - \frac{10,62}{32} \right) = 1,255 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg uhlí

$$O_{VZ \min}^s = \frac{100}{21} O_{O_2 \min} = \frac{100}{21} 1,255 = 5,976 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg uhlí

$$O_{VZ \min} = f \cdot O_{VZ \min}^s = 1,0168 \cdot 5,975 = 6,077 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.3)$$

Při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 70 % je součinitel $f = 1,0168$

Minimální množství suchých spalin

$$O_{sp \min}^s = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (3.4)$$

$$O_{sp \min}^s = 1,1113 + 0,0029 + 4,6725 + 0,05498 = 5,841 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Jednotlivé složky spalin**Objem CO₂**

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ\min}^s = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{59,86}{12,01} + 0,0003 \cdot 5,975 = 1,111 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.5)$$

Objem SO₂

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{prch}^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,425}{32,06} = 0,0029 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.6)$$

Objem N₂

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ\min}^s = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,96}{28,016} + 0,7805 \cdot 5,975 = 4,671 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.7)$$

Objem argonu

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ\min}^s = 0,0092 \cdot 5,975 = 0,0549 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.8)$$

Maximální množství CO₂

$$(CO_2)_{\min} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp\min}^s} \cdot 100 = \frac{1,1113}{5,8417} \cdot 100 = 19,02 \text{ \%} \quad (3.9)$$

Minimální objem vodní páry

$$O_{H_2O\min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f-1) \cdot O_{VZ\min}^s \quad (3.10)$$

$$O_{H_2O\min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,79}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{15}{18,016} + (1,0168-1) \cdot 5,976 = 0,708 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SP\min} = O_{SP\min}^s + O_{H_2O\min} = 5,841 + 0,708 = 6,549 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.11)$$

3.3 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin

Součinitel přebytku vzduchu na konci ohniště volím $\alpha = 1,24$ dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Skutečné množství vzduchu

$$O_{VZ} = \beta \cdot O_{VZ \min} = 1,1 \cdot 6,077 = 6,684 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.12)$$

Součinitel přebytku vzduchu β sleduje přísávání falešného vzduchu po trase spalin v kotli. V našem případě předpokládáme $\beta=1,1$ opět na doporučení vedoucího.

Skutečné množství spalin

$$O_{SP} = O_{SP \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min} = 6,549 + (1,24 - 1) \cdot 6,077 = 8,008 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.13)$$

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{sp}} = \frac{0,0029 + 1,1113}{8,0082} = 0,1391 \quad (3.14)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} = \frac{0,7321}{8,0082} = 0,0914$$

Kde

$$O_{H_2O} = O_{H_2O \min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^s \quad (3.15)$$

$$O_{H_2O} = 0,708 + (1,0168 - 1) \cdot (1,24 - 1) \cdot 5,976 = 0,7321 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,139 + 0,091 = 0,23 \quad (3.16)$$

3.4 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie vzniklá spálením 1 kg uhlí

$$I_{sp} = I_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ \min} + I_p \quad (3.17)$$

Entalpie spalin při $\alpha=1$

$$I_{sp} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (3.18)$$

Jednotlivé entalpie i pro příslušné složky spalin se odečtou z Tab. 2.2

Entalpie minimálního množství vzduchu při $\alpha=1$

$$I_{VZ \min} = O_{VZ \min}^s \cdot (c \cdot t)_{VZ} \quad (3.19)$$

t[°C]	CO ₂ [kJ/m ³]	N ₂ [kJ/m ³]	H ₂ O [kJ/m ³]	SO ₂ [kJ/m ³]	Ar [kJ/m ³]	popílek [kJ/m ³]	c _{vz} [kJ/m ³ K]
100	170	130	150	189	93	80,8	1,324
200	357	260	304	392	186	169	1,331
300	559	392	463	610	278	264	1,342
400	772	527	626	836	372	360	1,354
500	994	666	795	1070	465	458	1,368
600	1225	804	969	1310	557	560	1,383
700	1462	948	1149	1550	650	662	1,398
800	1705	1094	1334	1800	743	767	1,411
900	1952	1242	1526	2050	834	874	1,424
1000	2204	1392	1723	3205	928	984	1,437
1500	3504	2166	2779	3590	1390	1758	1,492
2000	4844	2965	3926	4890	1855	2512	1,532

Tab. 3.2 Entalpie složek spalin [1]

3.5. Entalpie spalin při recirkulaci

Při recirkulaci se zavádí část odebraných spalin z výstupu kotle do prostoru ohniště. Tato recirkulace se zavádí za účelem snížení teploty v ohništi. V tomto případě bude koeficient recirkulace $r=0,1$.

Objem spalin v místě odběru bez vlivu na recirkulaci

$$O_{SPod} = O_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin} = 6,549 + (1,38 - 1) \cdot 6,077 = 8,859 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.20)$$

Objem spalin od místa zavedení spalin až do odběru

$$O_{SPr} = O_{SP} + r \cdot O_{SPod} = 8,008 + 0,1 \cdot 8,859 = 8,894 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.21)$$

Entalpie recirkulovaných spalin

$$I_{sp} = \frac{O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}}{O_{spmin} \cdot O_{rSP}} + \frac{O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}}{O_{spmin} \cdot O_{rSP}} + \frac{O_{N_2} \cdot i_{N_2}}{O_{spmin} \cdot O_{rSP}} + \frac{(O_{H_2O} + O_{rH_2O}) \cdot i_{H_2O}}{O_{spmin} \cdot O_{rSP}} + \frac{O_{Ar} \cdot i_{Ar}}{O_{spmin} \cdot O_{rSP}} + O_{rVZ} \cdot (c \cdot t)_{VZ} \quad (3.22)$$

Objem recirkulovaných spalin

$$O_{rSP} = \frac{r \cdot O_{SPod}}{\alpha} = \frac{0,1 \cdot 8,859}{1,38} = 0,6419 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.23)$$

Objem vzduchu v recirkulaci

$$O_{rVZ} = \frac{r \cdot O_{SPod} - O_{rSP}}{f} = \frac{0,1 \cdot 8,859 - 0,6419}{1,0168} = 0,2399 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.24)$$

Objem vody v recirkulovaném vzduchu

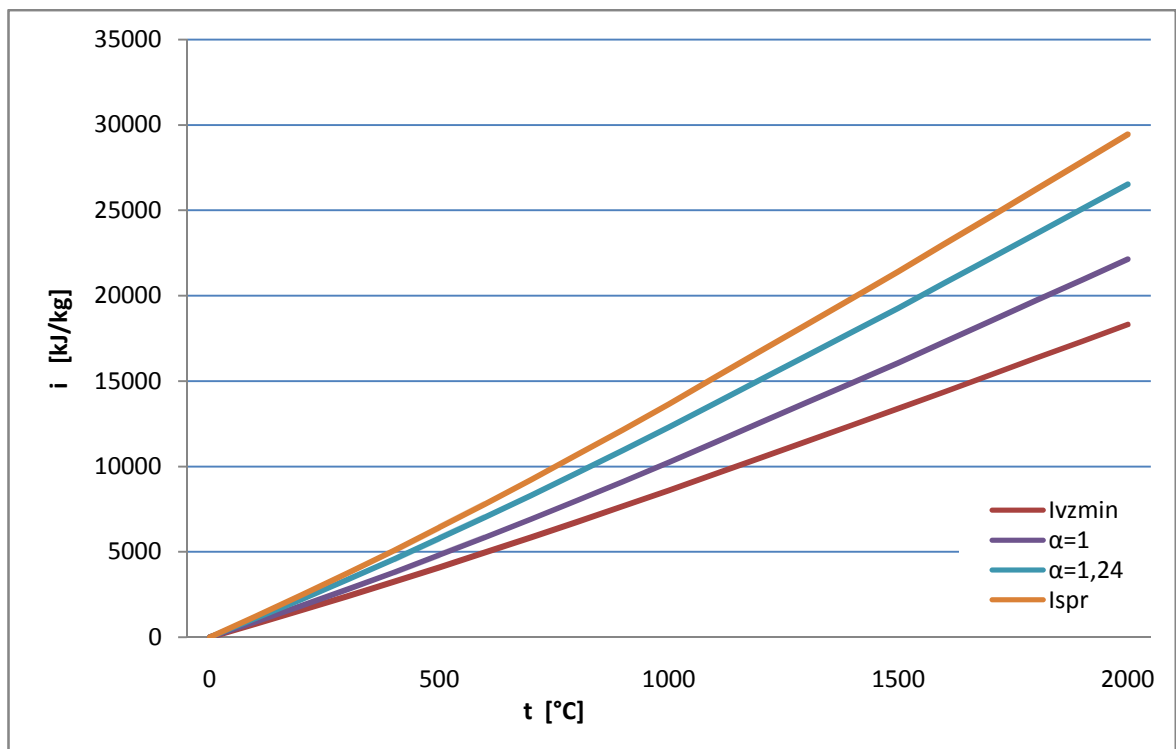
$$O_{rH_2O} = r \cdot O_{SPod} - O_{rSP} - O_{rVZ} = 0,1 \cdot 8,859 - 0,6419 - 0,2399 = 0,004 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.25)$$

Entalpie spalin od místa zavedení

$$I_{SPr} = I_{SP} + r \cdot I_{SPod} \quad (3.26)$$

t [°C]	I _{spmin}	I _{vzmin}	I _{sp}		I _{spr}
			α=1	α=1,24	α=1,24
100	908,2	791,3	908,2	1098,1	1219,5
200	1838,2	1591,0	1838,2	2220,0	2465,3
300	2797,7	2406,2	2797,7	3375,2	3747,9
400	3786,4	3237,0	3786,4	4563,3	5066,9
500	4808,1	4088,1	4808,1	5789,2	6427,8
600	5838,6	4959,5	5838,6	7028,8	7804,1
700	6908,0	5848,8	6908,0	8311,7	9228,2
800	7997,1	6746,5	7997,1	9616,2	10676,3
900	9104,8	7659,8	9104,8	10943,1	12149,1
1000	10233,7	8588,5	10233,7	12295,0	13649,7
1500	16069,1	13375,9	16069,1	19279,3	21402,4
2000	22133,1	18312,7	22133,1	26528,1	29448,3

Tab. 2.3I-t tabulka vzduchu a spalin



Obr. 3.1 i-t diagram spalin

4 Tepelná bilance kotle

4.1 Teplo přivedené do kotle

Teplo přivedené v palivu

$$Q_p^p = Q_i^r = 22608,7 \text{ kJ/kg} \quad (4.1)$$

4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)

Ztrátu způsobuje podíl spalitelných plynů (CO a uhlovodíky) ve spalínách. Pro granulační kotel na černé uhlí s V^{daf} větším než 25 % je dle [1] $\xi_{\text{CO}}=0,5 \%$.

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)

Tato ztráta je způsobena zbytkovým obsahem tuhého uhlíku v popílku a ve strusce (škváře), jeho energie tedy není využita.

$$\xi_{MN} = \xi_p + \xi_s = 0,334 + 0,106 = 0,44 \text{ \%} \quad (4.2)$$

Ztráta hořlavinou v popílku

$$\xi_p = 32600 \cdot \frac{c_p}{1-c_p} \cdot \frac{x_p}{Q_i^r} \cdot A^r = 32600 \cdot \frac{0,03}{1-0,03} \cdot \frac{0,8}{22608,7} \cdot 9,35 = 0,334 \text{ \%} \quad (4.3)$$

Ztráta hořlavinou ve škváře

$$\xi_s = 32600 \cdot \frac{c_s}{1-c_s} \cdot \frac{x_s}{Q_i^r} \cdot A^r = 32600 \cdot \frac{0,05}{1-0,05} \cdot \frac{0,15}{22608,7} \cdot 9,35 = 0,106 \text{ \%} \quad (4.4)$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Tato ztráta je způsobena nedokonalým dochlazením popílku a strusky před opuštěním kotle. Důsledkem je, že s nimi odchází fyzické teplo.

$$\xi_f = \xi_{sk} + \xi_{ul} = 0,036 + 0,401 = 0,437 \text{ \%} \quad (4.5)$$

Ztráta fyzickým teplem ve škváře

$$\xi_{sk} = \frac{1}{1-c_s} \cdot \frac{x_s}{Q_i^r} \cdot A^r \cdot i_{sk} = \frac{1}{1-0,05} \cdot \frac{0,15}{22608,7} \cdot 9,35 \cdot 560 = 0,036 \text{ \%} \quad (4.6)$$

Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$\xi_{ul} = \frac{1}{1-c_p} \cdot \frac{x_p}{Q_i^r} \cdot A^r \cdot i_{ul} = \frac{1}{1-0,03} \cdot \frac{0,8}{22608,7} \cdot 9,35 \cdot 1178 = 0,401 \% \quad (4.7)$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

Velikost ztráty je závislá na výkonu kotle a použitém palivu. Ztráta byla zvolena dle [1] $\xi_{SO}=0,6\%$.

Komínová ztráta

Na výstupu z kotle odchází do komína spaliny, ty obsahují nevyužitou energii, která byla uvolněna při spalování.

$$\xi_k = (100 - \xi_{MN}) \cdot \frac{O_{SP} \cdot c_{SP} \cdot (t_k - t_{vz})}{Q_p^p} = (100 - 0,44) \cdot \frac{8,859 \cdot 1,375 \cdot (165 - 20)}{22608,7} = 7,781 \% \quad (4.8)$$

$$O_{SP} = O_{SPmin} + (\alpha_k - 1) \cdot O_{vzmin} = 6,54 + (1,38 - 1) \cdot 6,07 = 8,859 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (4.9)$$

$$c_{sp} = \frac{I_{SP}}{O_{SP} \cdot t_k} = \frac{2010,9}{8,859 \cdot 165} = 1,375 \text{ kJ/m}^3\text{K} \quad (4.10)$$

4.3 Tepelná účinnost kotle

$$\eta = 100 - \xi_{CO} - \xi_{MN} - \xi_f - \xi_{SO} - \xi_K = 100 - 0,5 - 0,44 - 0,437 - 0,6 - 7,781 = 90,24 \% \quad (4.11)$$

4.4 Výrobní teplo páry

Kotel nemá mezipřihřívák ani odběr syté páry a neuvažujeme s odluhem.

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = \frac{130 \cdot 1000}{3600} \cdot (3438,1 - 990,2) = 88,396 \text{ MW} \quad (4.12)$$

4.5 Množství paliva

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta}{100}} = \frac{88396}{22608,7 \cdot \frac{90,24}{100}} = 4,33 \text{ kg/s} \quad (4.13)$$

5 Výpočet spalovací komory

Spalovací komoru tvoří membránové stěny. Zadní stěna komory je v horní části vyklenutá směrem do spalovací komory a tvoří tak nos spalovací komory, ten pak přechází do výparníkové mříže. Membránové stěny jsou vyztužené ocelovými bandážemi. Cirkulace ve výparníku se děje přirozeným způsobem.

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{4,33 \cdot 22608,7}{812,6} = 120,53 \text{ kW/m}^3 \quad (5.1)$$

Objem ohniště

Do objemu ohniště se musí přičíst spodní zešikmená část a odečíst nos v horní části ohniště.

$$V_o = V_{hl} + V_{vys} - V_{nos} \\ V_o = 6,4 \cdot 7,2 \cdot 16,8 + 6,4 \cdot 5,83 \cdot 1,55 - 6,4 \cdot 3,44 \cdot \frac{1,75}{2} = 812,7 \text{ m}^3 \quad (5.2)$$

Průřezové zatížení ohniště

$$q_f = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{f} = \frac{4,33 \cdot 22608,7}{7,2 \cdot 6,4} = 2,13 \text{ MW/m}^2 \quad (5.3)$$

f-průřez ohniště

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{ús} = \sum F_i \cdot x_i \\ F_{ús} = (F_{boky} + F_{PS} + F_{ZS}) \cdot x_i = (253,9 + 120,7 + 137,4) \cdot 1 = 512 \text{ m}^2 \\ F_{boky} = 2(16,802 \cdot 7,2 + 1,55 \cdot 5,83 - 0,5 \cdot 3,44 \cdot 1,755) = 253,9 \text{ m}^2 \\ F_{PS} = (2,063 + 16,802) \cdot 6,4 = 120,7 \text{ m}^2 \\ F_{ZS} = (2,063 + 15,047 + 4,35) \cdot 6,4 = 137,4 \text{ m}^2 \quad (5.4)$$

5.1 Tepelný výpočet ohniště

Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$t_0 = \frac{t_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1879 + 273,15}{1 + 0,376 \cdot \left(\frac{0,806}{0,369}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1072 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

Součinitel M

Součinitel M charakterizuje polohu maximální teploty plamene a jeho hodnota je závislá na použitých hořácích a jejich umístění ve stěnách.

$$M = 0,56 - 0,5 \cdot x_0 = 0,56 - 0,5 \cdot 0,37 = 0,376 \quad (5.6)$$

Hodnota x_0 se určí z poměrné výšky hořáků x_h a opravy Δx .

$$x_0 = x_h + \Delta x = 0,27 + 0,1 = 0,37 \quad (5.7)$$

$\Delta x = 0,1$

Poměrná výška hořáků

Poměrná výška hořáků je dána jejich umístěním ve spalovací komoře. V případě více řad hořáků se bere střední hodnota.

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{6,07}{22,65} = 0,27 \quad (5.8)$$

Boltzmanovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{PV} \cdot \overline{O_{SP}} \cdot C}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot F_{ús} \cdot T_a^3} = \frac{0,993 \cdot 3,9 \cdot 12,4}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 512 \cdot 2152^3} = 0,369 \quad (5.9)$$

Součinitel tepelné efektivity stěn

$$\psi = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,45 = 0,45 \quad (5.10)$$

x ...úhlový součinitel, pro membránové stěny $x=1$
 ξ ...součinitel zanesení stěn ohniště, pro spalování černého uhlí $\xi = 0,45$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{SO}}{\eta_k + Z_{SO}} = 1 - \frac{0,6}{90,24 + 0,6} = 0,993 \quad (5.11)$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp}} \cdot C = \frac{I_u - I_o}{t_a - t_o} = \frac{24774 - 14766}{1879 - 1072} = 12,4 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5.12)$$

Teplo uvolněné ve spalovací komoře

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - Z_{CO} - Z_C - Z_{fs}}{100 - Z_C} + Q_{VZ} - Q_{VZV} + r \cdot I_{spod} \quad (5.13)$$

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - 0,5 - 0,44 - 0,036}{100 - 0,44} + 2085 - 0 + 0,1 \cdot 2019 = 24774 \text{ kJ/kg}$$

Teplo přivedené do kotle ve vzduchu

$$Q_{VZ} = (\alpha - \Delta\alpha) \cdot I_{VZ \min}^H + \Delta\alpha \cdot I_{VZ \min}^I$$

$$Q_{VZ} = (1,24 - 0,18) \cdot 1975 + 0,18 \cdot 158 = 2085 \text{ kJ/kg} \quad (5.14)$$

Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a}{a + (1-a) \cdot \psi} = \frac{0,652}{0,652 + (1-0,652) \cdot 0,45} = 0,806 \quad (5.15)$$

Stupeň černosti prostředí v ohništi

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,8 \cdot 0,15 \cdot 736} = 0,652 \quad (5.16)$$

p...tlak v ohništi, p=0,1MPa

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$S = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{úš}} = 3,6 \cdot \frac{812,7}{512} = 5,73 \text{ m} \quad (5.17)$$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot H_1 \cdot H_2$$

$$k = 3,446 \cdot 0,23 + 0,0548 \cdot 0,0992 + 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,1 = 1,8 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (5.18)$$

k_k ...součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi $k_k=1$

H_1 ...součinitel, zohledňuje druh paliva, pro uhlí $H_1=1$

H_2 ...součinitel, zohledňuje způsob spalování, pro práškové ohniště $H_2=0,1$

Koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r \cdot X_p}{O_{sp} \cdot 100} = \frac{10 \cdot 9,35 \cdot 0,85}{8,008 \cdot 100} = 0,0992 \text{ g/m}^3 \quad (5.19)$$

A^r ...procento popelu v původním stavu paliva

X_p ...procento popelu v úletu, pro granulační kotel a černé uhlí $X_p=0,85$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1345^2 \cdot 16^2}} = 0,0555 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (5.20)$$

T_0 ...teplota spalín na výstupu z ohniště

d...střední efektivní průměr částiček popelu, d=16μm

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \quad (5.21)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 5,73}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1345}{1000} \right) = 3,51 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,23 = 0,023 \text{ } MPa \quad (5.22)$$

Teplo odevzdané v ohništi

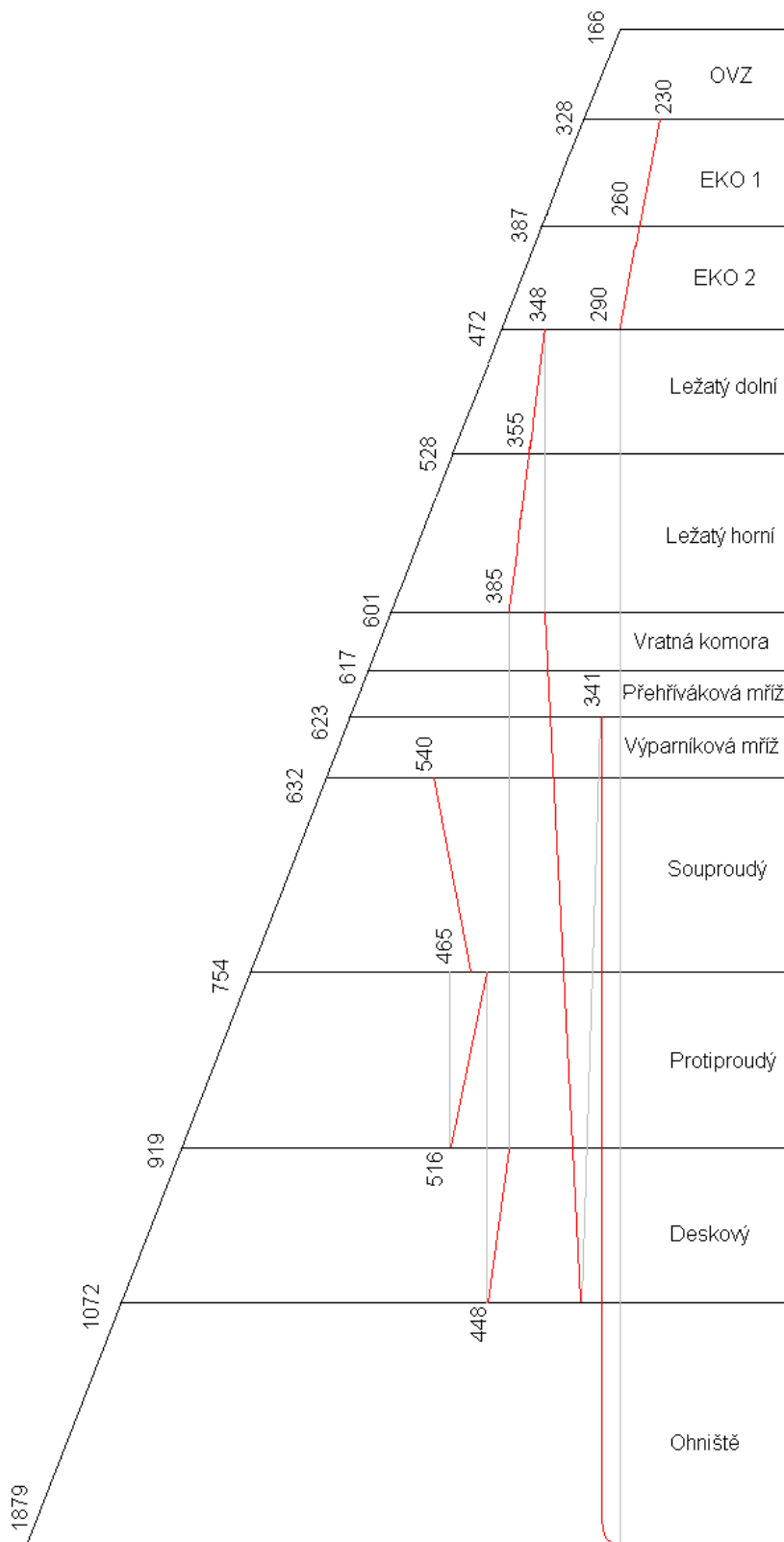
$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_0) = 0,993 \cdot (24774 - 14766) = 9942 \text{ } kJ/kg \quad (5.23)$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\frac{q}{F_{ús}} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_0)}{F_{ús}} = \frac{0,993 \cdot 3,9 \cdot (24774 - 14766)}{512} = 76,21 \text{ } kW/m^2 \quad (5.24)$$

6 Bilance výpočtu

Pilový diagram na Obr. 6 znázorňuje teplotní rozložení spalin a vody (páry) na jednotlivých teplosměnných plochách kotle. Číselné hodnoty jsou uvedené v °C.



Obr. 6 Pilový diagram

7 Oblast deskového přehříváku

Oblast deskového přehříváku se nachází nad ohništěm v prvním tahu kotle. Zde je hlavní teplosměnnou plochou deskový přehřívák, dále spaliny předávají teplo stěnám výparníku a stropnímu přehříváku. Pára do deskového přehříváku vstupuje z horního ležatého přehříváku.

7.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (14766 - 12429,7) = 2320,9 \text{ kJ/kg} \quad (7.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1072 + 919}{2} = 995 \text{ °C} \quad (7.2)$$

$$\lambda = 0,11 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,00018 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,58$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 1072 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 919 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 14766 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 12429,7 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8}{36,87} \left(1 + \frac{995}{273,15} \right) = 4,37 \text{ m/s} \quad (7.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d = 6,4 \cdot 6 - 8 \cdot 0,0318 \cdot 6 = 36,87 \text{ m}^2 \quad (7.4)$$

7.2 Deskový přehřívák

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0218 m
Příčná rozteč	S_1	0,7 m
Podélná rozteč	S_2	0,055 m
Počet trubek na desku	n_{tr}	13
Počet desek	z	8
Teplota páry na vstupu	t_{in}	385 °C
Teplota páry na výstupu	t_{out}	448 °C
Množství páry	M_{pp}	33,89 kg/s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,5 \cdot \frac{1}{\frac{1}{96,11} + \frac{1}{4680,47}} = 47,08 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.5)$$

Součinitel tepelné efektivity pro deskové přehříváky a spalování uhlí podle [1].
 $\psi = 0,5$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (35,8 + 65,3) = 96,11 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro deskový přehřívák

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{v} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (7.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,82 \cdot \frac{0,11}{0,0318} \cdot \left(\frac{4,37 \cdot 0,0318}{0,00018} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} = 35,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na počet podélných řad podle [1]

$$Z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (7.8)$$

$$Z_2 = 13$$

Oprava na uspořádání svazku podle [1]

$$c_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{S_1}{d} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{S_2}{d \cdot 2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (7.9)$$

$$c_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{700}{31,8} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{55}{31,8 \cdot 2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,82$$

Příčná rozteč $S_1 = 700$ mm, podélná rozteč $S_2 = 55$ mm.

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot 1270^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{1038}{1270} \right)^4}{1 - \frac{1038}{1270}} = 65,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,21} = 0,19 \quad (7.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (7.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (10,09 \cdot 0,23 + 0,057 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,92 = 0,216$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (7.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,92}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1270}{1000} \right) = 10,09 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{1270^2 \cdot 16^2}} = 0,057 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (7.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \text{ } \mu m$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}} = \frac{1,8}{\frac{1}{0,7} + \frac{1}{6} + \frac{1}{2,91}} = 0,92 \text{ } m \quad (7.15)$$

a-vzdálenost desek, b-výška desek, c-hloubka desek

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{\dot{sot}}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (7.16)$$

$$T_z = 416,5 + \left(0,014 + \frac{1}{4680,47} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 1700}{250} \cdot 1000 + 273,15 = 1083 \text{ } K$$

S- plocha přehříváku

ε -součinitel zanesení $\varepsilon = 0,014$ podle[1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (7.17)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0826}{0,0218} \cdot \left(\frac{15,89 \cdot 0,0218}{4,83 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,3^{0,4} = 4680,47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Teplota, tlak a látkové vlastnosti média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{385 + 448}{2} = 416,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.18)$$

$$p = 14,03 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,0826 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,3$$

Viskozita

$$\nu = 4,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,018 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost média

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{33,88}{0,0388} \cdot 0,018 = 15,89 \text{ m/s} \quad (7.19)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{ir} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0218^2}{4} \cdot 13 \cdot 8 = 0,0388 \text{ m}^2 \quad (7.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{624 - 533}{\ln\left(\frac{624}{533}\right)} = 577,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.21)$$

$$\Delta t_v = 1072 - 448 = 624 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 919 - 385 = 533 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7.22)$$

Výhřevná plocha

$$S = z \cdot S_1 \cdot x = 8 \cdot 35,3 \cdot 0,88 = 250,6 \text{ m}^2 \quad (7.23)$$

Plocha jedné desky

$$S_1 = 2 \cdot a \cdot (c + D) = 2 \cdot 6 \cdot (2,91 \cdot 0,0318) = 35,3 \text{ m}^2 \quad (7.24)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{\text{tot}} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{\text{pv}} \cdot 1000} = \frac{47,08 \cdot 250,6 \cdot 577,6}{3,9 \cdot 1000} = 1743,52 \text{ kJ/kg} \quad (7.25)$$

7.3 Stěny výparníku v oblasti deskového přehříváku

Plocha přední stěny	S_p	38,4 m ²
Plocha boků	S_b	48,12 m ²
Plocha stěn	S	86,52 m ²
Teplota média	t	341 °C

Součinitel přestupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 47,73 = 30,79 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.26)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_k + \alpha_s) = 0,98 \cdot (6,31 + 41,73) = 47,73 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.27)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (7.28)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,11}{1,22} \cdot \left(\frac{4,83 \cdot 1,22}{0,00018} \right)^{0,8} \cdot 0,58^{0,4} = 6,31 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 36,87}{18,4 + 6,4 + 16 \cdot 6} = 1,22 \text{ m} \quad (7.29)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.30)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot 1270^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{702}{1270}\right)^4}{1 - \frac{702}{1270}} = 41,38 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (7.2) u výpočtu (7.10) deskového přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \varepsilon \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{všot}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (7.31)$$

$$T_z = 341 + 0,0043 \cdot \frac{3,9 \cdot 450}{86,52} \cdot 1000 + 273,15 = 702 \text{ K}$$

S- plocha stěn výparníku

t - teplota média

ε -součinitel zanesení $\varepsilon = 0,0043$ podle[1]

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{731 - 578}{\ln\left(\frac{731}{578}\right)} = 651,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.32)$$

$$\Delta t_v = 1072 - 341 = 731 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 919 - 341 = 578 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.33)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{všot} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{30,79 \cdot 86,52 \cdot 651,3}{3,9 \cdot 1000} = 443,88 \text{ kJ/kg} \quad (7.34)$$

7.4 Strop nad oblastí deskového přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	25,26 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	341 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	354 °C
Množství páry	M _{pp}	33,89 kg/s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{48,29} + \frac{1}{3055,6}} = 30,90 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.35)$$

Součinitel tepelné efektivity pro stropní přehříváky a spalování uhlí podle [1] $\psi = 0,65$.

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 6,31 + 41,98 = 48,29 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.36)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k je stejný jako u výparníku v oblasti deskového přehříváku ve výpočtu (7.28).

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.37)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot 1270^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{714}{1270}\right)^4}{1 - \frac{714}{1270}} = 41,98 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálové vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (7.2) u výpočtu (7.10) deskového přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{S\dot{s}ot}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (7.38)$$

$$T_z = 347,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{3055,66} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 130}{25,26} \cdot 1000 + 273,15 = 714 \text{ K}$$

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.39)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (7.40)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,086}{0,028} \cdot \left(\frac{5,11 \cdot 0,028}{2,9 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,6^{0,4} = 3055,66 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tento součinitel α_2 je stejný pro celý stropní přehřívák, stěny druhého tahu, mříž přehříváku a i pro závěsy ležatých přehříváků.

Látkové vlastnosti média

$$p = 14,65 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,086 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,6$$

Viskozita

$$\nu = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0117 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost páry

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{33,89}{0,0775} \cdot 0,0117 = 5,11 \text{ m/s} \quad (7.41)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 126 = 0,0775 \text{ m}^2 \quad (7.42)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{718 - 578}{\ln\left(\frac{718}{578}\right)} = 645,31 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.43)$$

$$\Delta t_v = 1072 - 354 = 718 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 919 - 341 = 578 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.44)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{S\dot{s}ot} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{30,9 \cdot 25,26 \cdot 645,31}{3,9 \cdot 1000} = 128,83 \text{ kJ/kg} \quad (7.45)$$

7.5 Celková bilance oblasti deskového přehříváku

$$Q_v = Q_{\dot{s}ot} + Q_{V\dot{s}ot} + Q_{S\dot{s}ot} \quad (7.46)$$
$$Q_v = 1743,52 + 443,88 + 128,82 = 2316,24 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{2320,92 - 2316,24}{2320,92} \cdot 100 = 0,20 \text{ \%} \quad (7.47)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

8 Oblast protiproudého přehříváku

Oblast se nachází nad nosem kotle mezi deskovým a souproutým přehřívákem. Hlavní teplosměnnou plochou je zde přehřívák protiproudý. Dále spaliny předávají teplo stěnám výparníku a stropnímu přehříváku. Pára z deskového přehříváku vstupuje do přehříváku protiproudého.

8.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (12429,7 - 10010,2) = 2403,6 \text{ kJ/kg} \quad (8.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{919 + 754}{2} = 836 \text{ °C} \quad (8.2)$$

$$\lambda = 0,095 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000143 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,595$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 919 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 754 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 12429,7 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 10010,2 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{22,98} \left(1 + \frac{836}{273,15} \right) = 6,15 \text{ m/s} \quad (8.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

Vypočítá se jako střední aritmetický průměr vstupního a výstupního průřezu.

$$F_{sp} = \frac{a \cdot (b_1 + b_2) - z \cdot (l_1 + l_2) \cdot d}{2} \quad (8.4)$$

$$F_{sp} = \frac{6,4 \cdot (5304 + 4971) - 62 \cdot 0,0318 \cdot (5194 + 4861)}{2} = 22,98 \text{ m}^2$$

8.2 Protiproudý přehřívák

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	4,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0228 m
Příčná rozteč	S ₁	0,1 m
Podélná rozteč	S ₂	0,045 m
Počet svazků	z	124
Počet řad ve svazku	z ₂	6
Délka jednoho svazku	l _{sv}	41,37 m
Plocha jednoho svazku	S _{sv}	4,13 m ²
Plocha přehříváku	S	512,47 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	448 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	516 °C
Množství páry	M _{pp}	33,89 kg/s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{84,66}{1 + \left(0,0079 + \frac{1}{3173,4} \right) \cdot 84,66} = 49,93 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 65,94 + 18,72 = 84,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro vystřídání uspořádání

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (8.7)$$

$$\alpha_k = 0,362 \cdot 0,945 \cdot \frac{0,095}{0,0318} \cdot \left(\frac{6,15 \cdot 0,0318}{14,38 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,595^{0,33} = 65,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{100}{31,8} = 3,144$$

$$\sigma_2 = \frac{45}{31,8} = 1,415$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,144^2 + 1,415^2} = 2,11 \quad (8.8)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{3,144 - 1}{2,11 - 1} = 1,922$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,922^{0,1} = 0,362$$

Oprava na počet řad

$$c_z = 4 \cdot z_2^{0,02} - 3,2 = 4 \cdot 6^{0,02} - 3,2 = 0,945 \quad (8.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,089 \cdot 1110^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{893}{1110}\right)^4}{1 - \frac{893}{1110}} = 18,72 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu stěn $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,094} = 0,089 \quad (8.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (30,55 \cdot 0,23 + 0,063 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,133 = 0,094$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (8.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,133}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1110}{1000} \right) = 30,55 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{1110^2 \cdot 16^2}} = 0,063 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa} \quad (8.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,045}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,133 \text{ m} \quad (8.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{pp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (8.16)$$

$$T_z = 482 + \left(0,0079 + \frac{1}{3173,4} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 2200}{512,47} \cdot 1000 + 273,15 = 893 \text{ K}$$

S- teplosměnná plocha přehříváku

ε -součinitel zanesení $\varepsilon = 0,0079$ podle[1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (8.17)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0823}{0,0218} \cdot \left(\frac{14,68 \cdot 0,0218}{6,44 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,06^{0,4} = 3173,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Teplota, tlak a látkové vlastnosti média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{448 + 516}{2} = 482 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.18)$$

$$p = 13,87 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,0823 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,06$$

Viskozita

$$\nu = 6,44 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0219 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost páry

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{33,89}{0,0506} \cdot 0,0219 = 14,68 \text{ m/s} \quad (8.19)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0218^2}{4} \cdot 124 = 0,0506 \text{ m}^2 \quad (8.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{403 - 306}{\ln \left(\frac{403}{306} \right)} = 352 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.21)$$

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 919 - 516 = 403 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 754 - 448 = 306 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{8.22}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{pp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{49,93 \cdot 512,47 \cdot 352}{3,9 \cdot 1000} = 2304,76 \text{ kJ/kg}\tag{8.23}$$

8.3 Stěny výparníku v oblasti protiproudého přehříváku

Plocha nosu v oblasti přehříváku	S_s	13,46 m ²
Plocha boků	S_b	17,3 m ²
Plocha celkem	S	30,76 m ²

Součinitel přestupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 26,82 = 17,43 \text{ W/m}^2\text{K}\tag{8.24}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 13,36 + 13,45 = 26,82 \text{ W/m}^2\text{K}\tag{8.25}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \\ \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{0,095}{0,1421} \cdot \left(\frac{6,15 \cdot 0,1421}{0,000143} \right)^{0,8} \cdot 0,595^{0,4} = 13,36 \text{ W/m}^2\text{K}\end{aligned}\tag{8.26}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 22,98}{5,028 \cdot 124 + 2 \cdot 5,138 + 2 \cdot 6,4} = 0,1421 \text{ m}\tag{8.27}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.28)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,089 \cdot 1110^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{65}{1110}\right)^4}{1 - \frac{652}{1110}} = 13,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (8.2) u výpočtu (8.10) protiproudého přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \varepsilon \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{vpp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (8.29)$$

$$T_z = 341 + 0,0043 \cdot \frac{3,9 \cdot 70}{30,76} \cdot 1000 + 273,15 = 652 \text{ K}$$

S- teplosměnná plocha stěn výparníku

ε - součinitel zanesení $\varepsilon = 0,0043$ podle [1]

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{578 - 413}{\ln\left(\frac{578}{413}\right)} = 490,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.30)$$

$$\Delta t_v = 919 - 341 = 578 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 754 - 341 = 413 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.31)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{vpp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{17,43 \cdot 30,76 \cdot 490,7}{3,9 \cdot 1000} = 67,30 \text{ kJ/kg} \quad (8.32)$$

8.4 Strop nad oblastí protiproudého přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	10,71 m ²

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{27,01} + \frac{1}{3055,6}} = 17,4 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.33)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 13,36 + 13,65 = 27,01 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.34)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k je stejný jako u výparníku v oblasti protiproudého přehříváku ve výpočtu (8.26).

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.35)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,089 \cdot 1110^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{663}{1110}\right)^4}{1 - \frac{663}{1110}} = 13,65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálové vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (8.2) u výpočtu (8.10) protiproudého přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{spp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (8.36)$$

$$T_z = 347,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{3055,66} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 25}{10,71} \cdot 1000 + 273,15 = 663 \text{ K}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{565 - 413}{\ln\left(\frac{565}{413}\right)} = 484,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.37)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 919 - 354 = 565 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 754 - 341 = 413 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (8.38)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{Spp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{17,40 \cdot 10,71 \cdot 484,9}{3,9 \cdot 1000} = 23,12 \text{ kJ/kg} \quad (8.39)$$

8.5 Celková bilance oblasti protiproudého přehříváku

$$\begin{aligned} Q_v &= Q_{pp} + Q_{vpp} + Q_{Spp} \\ Q_v &= 2304,75 + 67,30 + 23,12 = 2395,18 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (8.40)$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{2403,59 - 2395,18}{2403,59} \cdot 100 = 0,35 \text{ } \% \quad (8.41)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

9 Oblast souproutého přehříváku

Oblast se nachází nad nosem kotle mezi protiproudým přehřívákem a výparníkovou mříží. Hlavní teplosměnnou plochou je zde souproutý přehřívák. Dále spaliny předávají teplo stěnám výparníku a stropnímu přehříváku. Pára z protiproudého přehříváku je ochlazována regulačním vstřikem napájecí vody a vstupuje do přehříváku souproutého. Odtud vystupuje pára o parametrech 540 °C, 13,6 MPa.

9.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (10010,2 - 8262,7) = 1736,98 \text{ kJ/kg} \quad (9.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{754 + 632}{2} = 639 \text{ °C} \quad (9.2)$$

$$\lambda = 0,0838 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0001162 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,61$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 754 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 632 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 10010,2 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 8262,7 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{18,62} \left(1 + \frac{639}{273,15} \right) = 6,61 \text{ m/s} \quad (9.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

Vypočítá jako střední aritmetický průměr vstupního a výstupního průřezu.

$$F_{sp} = \frac{a \cdot (b_1 + b_2) - z \cdot (l_1 + l_2) \cdot d}{2} \quad (9.4)$$

$$F_{sp} = \frac{6,4 \cdot (4310 + 3755) - 62 \cdot 0,0318 \cdot (4310 + 3755)}{2} = 18,62 \text{ m}^2$$

9.2 Souproudý přehřívák

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	4,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0228 m
Příčná rozteč	S ₁	0,1 m
Podélná rozteč	S ₂	0,045 m
Počet svazků	z	124
Počet řad ve svazku	z ₂	10
Délka jednoho svazku	l _{sv}	30,39 m
Plocha jednoho svazku	S _{sv}	3,03 m ²
Plocha přehříváku	S	376,47 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	465 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	540 °C
Množství páry	M _{pp}	36,11 kg/s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{89,81}{1 + \left(0,00736 + \frac{1}{3524,57} \right) \cdot 89,81} = 52,50 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (9.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 73,13 + 16,68 = 89,81 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (9.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro vystřídané uspořádání

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (9.7)$$

$$\alpha_k = 0,362 \cdot 1 \cdot \frac{0,0838}{0,0318} \cdot \left(\frac{6,61 \cdot 0,0318}{11,62 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,61^{0,33} = 73,13 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{100}{31,8} = 3,144$$

$$\sigma_2 = \frac{45}{31,8} = 1,415$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,144^2 + 1,415^2} = 2,11 \quad (9.8)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{3,144 - 1}{2,11 - 1} = 1,922$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,922^{0,1} = 0,362$$

Oprava na počet řad

$$z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (9.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0975 \cdot 966^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{915}{966}\right)^4}{1 - \frac{915}{966}} = 16,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu stěn $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,102} = 0,0975 \quad (9.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (9.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (33,29 \cdot 0,23 + 0,069 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,133 = 0,102$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (9.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,133}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{966}{1000} \right) = 33,29 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{966^2 \cdot 16^2}} = 0,069 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (9.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \text{ } \mu m$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,045}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,133 \text{ } m \quad (9.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{sp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (9.16)$$

$$T_z = 502,5 + \left(0,00763 + \frac{1}{3525,57} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 1700}{376,47} \cdot 1000 + 273,15 = 915 \text{ } K$$

S- teplosměnná plocha přehříváku

ε -součinitel zanesení $\varepsilon = 0,00763$ podle[1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (9.17)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,08315}{0,0218} \cdot \left(\frac{18,09 \cdot 0,0218}{7 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,02^{0,4} = 3524,57 \text{ } W/m^2 K$$

Teplota, tlak a látkové vlastnosti média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{465 + 540}{2} = 502,5 \text{ } ^\circ C \quad (9.18)$$

$$p = 13,72 \text{ } MPa$$

$$\lambda = 0,08315 \text{ } W/mK$$

$$Pr = 1,02$$

Viskozita

$$\nu = 7 \cdot 10^{-7} \text{ } m^2/s$$

Měrný objem páry

$$v = 0,0231 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost média

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{36,11}{0,0506} \cdot 0,0231 = 18,09 \text{ m/s} \quad (9.19)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0218^2}{4} \cdot 124 = 0,0506 \text{ m}^2 \quad (9.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{289 - 92}{\ln\left(\frac{289}{92}\right)} = 334,66 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.21)$$

$$\Delta t_v = 745 - 465 = 289 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 632 - 540 = 92 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.22)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{sp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{42,50 \cdot 376,47 \cdot 334,66}{3,9 \cdot 1000} = 1686,65 \text{ kJ/kg} \quad (9.23)$$

9.3 Stěny výparníku v oblasti souprůdného přehříváku

Plocha nosu v oblasti přehříváku	S_s	11,79 m ²
Plocha boků	S_b	11,72 m ²
Plocha celkem	S	23,51 m ²

Součinitel přestupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 25,63 = 16,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.24)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 14,85 + 10,78 = 25,63 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.25)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (9.26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0838}{0,1429} \cdot \left(\frac{6,15 \cdot 0,1429}{0,0001162} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} = 14,85 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 18,62}{4,032 \cdot 124 + 2 \cdot 4,152 + 2 \cdot 6,4} = 0,1429 \text{ m} \quad (9.27)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.28)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,089 \cdot 966^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{639}{966} \right)^4}{1 - \frac{639}{966}} = 10,78 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálové vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (9.2) u výpočtu (9.10) souproudeho přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách

$$T_z = t + \varepsilon \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{vsp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (9.29)$$

$$T_z = 341 + 0,0043 \cdot \frac{3,9 \cdot 35}{23,51} \cdot 1000 + 273,15 = 639 \text{ K}$$

S- teplosměnná plocha stěn výparníku

ε - součinitel zanesení $\varepsilon = 0,0043$ podle [1]

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{413 - 291}{\ln \left(\frac{413}{291} \right)} = 348,56 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.30)$$

$$\Delta t_v = 754 - 341 = 413 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 632 - 341 = 291 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.31)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{vsp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{16,66 \cdot 23,51 \cdot 384,56}{3,9 \cdot 1000} = 34,92 \text{ kJ/kg} \quad (9.32)$$

8.4 Strop nad oblastí souproudeho přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	9,39 m ²

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{25,81} + \frac{1}{3055,6}} = 16,64 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.33)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 14,85 + 10,96 = 25,81 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.34)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k je stejný jako u výparníku v oblasti souproudeho přehříváku ve výpočtu (9.26).

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.35)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0975 \cdot 966^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{650}{966}\right)^4}{1 - \frac{650}{966}} = 10,96 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (9.2) u výpočtu (9.10) souproudeho přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{Spp}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (9.36)$$

$$T_z = 347,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{3055,66} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 15}{9,39} \cdot 1000 + 273,15 = 650 \text{ K}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{400 - 291}{\ln\left(\frac{400}{291}\right)} = 342,73 \text{ °C} \quad (9.37)$$

$$\Delta t_v = 754 - 354 = 400 \text{ °C}$$

$$\Delta t_m = 632 - 341 = 291 \text{ °C} \quad (9.38)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{Ssp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{16,64 \cdot 9,39 \cdot 342,73}{3,9 \cdot 1000} = 13,69 \text{ kJ/kg} \quad (9.39)$$

9.5 Celková bilance oblasti souproutého přehříváku

$$Q_v = Q_{sp} + Q_{vsp} + Q_{Ssp}$$

$$Q_v = 1686,65 + 34,92 + 13,69 = 1735,27 \text{ kJ/kg} \quad (9.40)$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1735,98 - 1735,27}{1735,97} \cdot 100 = 0,04 \text{ %} \quad (9.41)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

10 Oblast výparníkové mříže

Oblast výparníkové mříže se nachází mezi souproutým přehřívákem a přehřívákovou mříží. Zde je hlavní teplosměnnou plochou výparníková mříž, dále spaliny předávají teplo stropního přehříváku, stěnám druhého tahu a stěnám výparníku.

10.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (8262,7 - 8135,9) = 125,9 \text{ kJ/kg} \quad (10.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{632 + 623}{2} = 628 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10.2)$$

$$\lambda = 0,07775 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0001028 \text{ m}^2/\text{s}$$

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

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 632 \text{ }^\circ\text{C}$
--------------------------	------------------------------------

Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 623 \text{ }^\circ\text{C}$
---------------------------	------------------------------------

Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 8262,7 \text{ kJ/kg}$
---------------------------	------------------------------

Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 8135,9 \text{ kJ/kg}$
----------------------------	------------------------------

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{17,84} \left(1 + \frac{628}{273,15} \right) = 6,43 \text{ m/s} \quad (10.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d$$

$$F_{sp} = 6,4 \cdot 3,393 - 10 \cdot 3,393 \cdot 0,1143 = 17,84 \text{ m}^2 \quad (10.4)$$

10.2 Mříž výparníku

Vnější průměr trubky	D	0,1143 m
Tloušťka stěny	tl	12,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0893 m
Příčná rozteč	S ₁	0,58 m
Počet trubek	z	10
Délka jedné trubky	l _{tr}	3,393 m
Plocha jedné trubky	S _{tr}	1,218 m ²
Plocha mříže	S	12,18 m ²
Teplota páry na vstupu	t	341 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{119,31}{1 + 0,0043 \cdot 119,31} = 78,85 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 95,2 + 24,11 = 119,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (10.7)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,8 \cdot \frac{0,07775}{0,1143} \cdot \left(\frac{6,43 \cdot 0,1143}{10,28 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,615^{0,33} = 95,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na počet řad

$$c_z = 4 \cdot z^{0,02} - 3,2 = 4 \cdot 1^{0,02} - 3,2 = 0,8 \quad (10.8)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.9)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,68 + 1}{2} \cdot 0,244 \cdot 901^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{694}{901} \right)^4}{1 - \frac{694}{901}} = 24,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu mříže $a_{st} = 0,68$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,279} = 0,244 \quad (10.10)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (10.11)$$

$$k \cdot p \cdot s = (12,31 \cdot 0,23 + 0,0726 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,983 = 0,279$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (10.12)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,983}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{901}{1000} \right) = 12,31 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{901^2 \cdot 16^2}} = 0,0726 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (10.13)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 3,5 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,5 \cdot \frac{6,4 \cdot 1,2 \cdot (4,373 - 3,393)}{16,88 + 9,92} = 0,983 \text{ } m \quad (10.14)$$

V- objem sálající vrstvy

F_{st}- povrch stěn v prostoru

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (10.15)$$

$$T_z = 341 + 80 + 273,15 = 694 \text{ } K$$

S- teplosměnná plocha přehříváku

t- teplota média

Δt -pro výparníkovou mříž dle [1]

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{291 - 282}{\ln\left(\frac{291}{282}\right)} = 287 \text{ } ^\circ C \quad (10.16)$$

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 632 - 341 = 291 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 623 - 341 = 282 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{10.17}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{mř} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{78,43 \cdot 12,18 \cdot 287}{3,9 \cdot 1000} = 70,43 \text{ kJ/kg}\tag{10.18}$$

10.3 Spodní stěna výparníku v oblasti výparníkové mříže

Plocha výparníku S 9,92 m²

Součinitel přestupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 34,09 = 22,16 \text{ W/m}^2\text{K}\tag{10.19}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 10,48 + 23,61 = 34,09 \text{ W/m}^2\text{K}\tag{10.20}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}\tag{10.21}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,07775}{0,837} \cdot \left(\frac{6,43 \cdot 0,837}{10,28 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,615^{0,4} = 10,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 17,84}{3,393 \cdot 22 + 2 \cdot 6,4 + 20 \cdot 0,1143} = 0,837 \text{ m}\tag{10.22}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}}\tag{10.23}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,244 \cdot 901^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{641}{901} \right)^4}{1 - \frac{641}{901}} = 23,61 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$. Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálové vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (10.2) u výpočtu (10.9) mříže výparníku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \varepsilon \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{vmř}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (10.24)$$

$$T_z = 341 + 0,0043 \cdot \frac{3,9 \cdot 16}{9,92} \cdot 1000 + 273,15 = 641 \text{ K}$$

S- teplosměnná plocha stěn výparníku

t- teplota média

ε -součinitel zanesení $\varepsilon = 0,0043$ podle[1]

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{291 - 282}{\ln\left(\frac{291}{282}\right)} = 286,73 \text{ °C} \quad (10.25)$$

$$\Delta t_v = 632 - 341 = 291 \text{ °C}$$

$$\Delta t_m = 623 - 341 = 282 \text{ °C} \quad (10.26)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{vmř} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{22,16 \cdot 9,92 \cdot 286,73}{3,9 \cdot 1000} = 16,12 \text{ kJ/kg} \quad (10.27)$$

10.4 Strop a stěny v oblasti výparníkové mříže

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	16,87 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	341 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	354 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{34,67} + \frac{1}{3055,6}} = 29,87 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.28)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 24,19 + 10,48 = 34,67 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.29)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k je stejný jako u výparníku v oblasti souproudeho přehříváku ve výpočtu (10.21).

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.30)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,244 \cdot 901^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{656}{901}\right)^4}{1 - \frac{656}{901}} = 24,19 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálové vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (10.3) u výpočtu (10.24) souproudeho přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q_{Smř}}{S} \cdot 1000 + 273,15 \quad (10.31)$$

$$T_z = 347,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{3055,66} \right) \cdot \frac{3,9 \cdot 35}{16,87} \cdot 1000 + 273,15 = 656 \text{ K}$$

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.39)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{278 - 282}{\ln\left(\frac{278}{282}\right)} = 280,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.32)$$

$$\Delta t_v = 632 - 354 = 278 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 623 - 341 = 282 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.33)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{Smř} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{29,87 \cdot 16,87 \cdot 280,25}{3,9 \cdot 1000} = 36,14 \text{ kJ/kg} \quad (10.34)$$

10.5 Celková bilance oblasti výparníkové mříže

$$Q_v = Q_{mř} + Q_{vmř} + Q_{Smř}$$
$$Q_v = 70,43 + 16,12 + 36,14 = 122,70 \text{ kJ/kg} \quad (10.35)$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{125,91 - 122,70}{125,91} \cdot 100 = 2,55 \text{ \%} \quad (10.35)$$

Odchylka se pohybuje v normě 5 % pro mříž, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

11 Oblast přehřívákové mříže

Pára do mříže vstupuje ze stropního přehříváku. Počítáme zde pouze s jednou teplosměnnou plochou a tou je přehříváková mříž. Oblast se nachází mezi výparníkovou mříží a vratnou komorou.

11.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (8135,9 - 8049,02) = 86,3 \text{ kJ/kg} \quad (11.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{623 + 617}{2} = 620 \text{ °C} \quad (11.2)$$

$$\lambda = 0,07775 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0001028 \text{ m}^2/\text{s}$$

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

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 623 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 617 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 8135,9 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 8049,02 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{21,62} \left(1 + \frac{620}{273,15} \right) = 5,3 \text{ m/s} \quad (11.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d$$

$$F_{sp} = 6,4 \cdot 3,86 - 21 \cdot 0,038 \cdot 3,86 = 21,62 \text{ m}^2 \quad (11.4)$$

11.2 Mříž přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Příčná rozteč	S_1	0,3 m
Podélná rozteč	S_2	0,105 m
Počet trubek	z	21
Počet řad	z_r	3
Délka jedné trubky	l_{tr}	3,86 m
Plocha jedné trubky	S_{tr}	0,46 m ²
Plocha mříže	S	29,03 m ²
Teplota páry na vstupu	t_{in}	341 °C
Teplota páry na výstupu	t_{out}	354 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{65,89} + \frac{1}{3055,6}} = 41,92 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 44,39 + 21,5 = 65,89 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (11.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9225 \cdot \frac{0,07775}{0,038} \cdot \left(\frac{5,3 \cdot 0,038}{10,28 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,615^{0,33} = 44,39 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\frac{S_2}{d} \geq 2 \Rightarrow c_s = 1 \quad (11.8)$$

Oprava na počet řad

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_f - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (11.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (11.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,68 + 1}{2} \cdot 0,238 \cdot 893^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{651}{893} \right)^4}{1 - \frac{651}{893}} = 21,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu mříže $a_{st} = 0,68$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,272} = 0,239 \quad (11.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (11.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (12,83 \cdot 0,23 + 0,073 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,916 = 0,272$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (11.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,916}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{893}{1000} \right) = 12,83 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{893^2 \cdot 16^2}} = 0,073 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (11.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,3 \cdot 0,105}{\pi \cdot 0,038^2} - 1 \right) = 0,916 \text{ } m \quad (11.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (11.16)$$

$$T_z = 357,5 + 60 + 273,15 = 651 \text{ } K$$

Δt - pro přehřívákovou mříž dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347,5 \text{ } ^\circ C \quad (11.17)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{269 - 276}{\ln\left(\frac{269}{276}\right)} = 273 \text{ } ^\circ C \quad (11.18)$$

$$\Delta t_v = 623 - 354 = 269 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_m = 617 - 341 = 276 \text{ } ^\circ C \quad (11.19)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{mř} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{41,92 \cdot 29,03 \cdot 273}{3,9 \cdot 1000} = 84,9 \text{ } kJ/kg \quad (11.20)$$

11.3 Celková bilance oblasti přehřívákové mříže

$$Q_v = Q_{mř} = 84,9 \text{ kJ/kg} \quad (11.21)$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{86,3 - 84,9}{86,3} \cdot 100 = 1,62 \text{ \%} \quad (11.22)$$

Odchylka se pohybuje v normě 5 % pro mříž, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

12 Oblast vratné komory

V této oblasti se děje přestup tepla pouze sáláním. V oblasti jsou teplosměnnými plochami stěny druhého tahu, strop nad druhým tahem a závěsy ležatého přehříváku. Ve všech těchto teplosměnných zařízeních proudí médium o stejné teplotě, proto spočítáme všechny tyto plochy jedním výpočtem.

12.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (8049,02 - 7815,46) = 232,02 \text{ kJ/kg} \quad (12.1)$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{601 + 617}{2} = 609 \text{ °C} \quad (12.2)$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 617 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 601 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 8049,02 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 7815,46 \text{ kJ/kg}$

12.2 Vratná komora

Plocha stropu	S_{st}	23,68 m ²
Plocha boků	S_b	33,3 m ²
Plocha zadní stěny	S_{zs}	28,8 m ²
Plocha přední stěny	S_{ps}	2,88 m ²
Vnější průměr závěsů	D	0,038 m
Tloušťka trubek závěsů	tl	5 mm
Počet závěsů	z	64
Plocha závěsů	S_z	33,31 m ²

Předané teplo ve vratné komoře

$$Q_v = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{ús}}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{45,32 \cdot (609 - 407) \cdot 98,65}{3,9 \cdot 1000} = 230,4 \text{ kJ/kg} \quad (12.3)$$

Účinná sálavá plocha

$$F_{ús} = S_{st} + S_b + S_{zs} + S_{ps} + S_z \quad (12.4)$$

$$F_{ús} = 23,68 + 33,3 + 28,8 + 2,88 + 33,31 = 98,65 \text{ m}^2$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (12.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,455 \cdot 609^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{407}{609}\right)^4}{1 - \frac{407}{609}} = 45,32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu spalování uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,608} = 0,455 \quad (12.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (12.7)$$

$$k \cdot p \cdot s = (8,37 \cdot 0,23 + 0,074 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 3,14 = 0,608$$

Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (12.8)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 3,14}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{882}{1000} \right) = 8,37 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{882^2 \cdot 16^2}} = 0,074 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa} \quad (12.9)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{ús}} = 3,5 \cdot \frac{3,7 \cdot 4,5 \cdot 6,4 - 62 \cdot 4,5 \cdot \frac{0,038^2}{4} \cdot \pi}{98,65} = 3,14 \text{ m} \quad (12.10)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \Delta t \quad (12.11)$$

$$t_z = 347 + 60 = 407 \text{ K}$$

Δt -pro přehříváky páry v druhém tahu, spalování uhlí a $t_{st} \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.12)$$

12.3 Celková bilance oblasti vratné komory

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{232,02 - 230,4}{232,02} \cdot 100 = 0,69 \text{ } \% \quad (12.13)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

13 Oblast horního ležatého přehříváku

Oblast se nachází v druhém tahu kotle mezi vratnou komorou a dolním ležatým přehřívákem. Hlavní teplosměnnou plochou je horní ležatý přehřívák. Dále spaliny předávají teplo i stěnám druhého tahu. Pára sem vstupuje z dolního ležatého přehříváku.

13.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (7815,46 - 6813,14) = 995,7 \text{ kJ/kg} \quad (13.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{601 + 528}{2} = 564,5 \text{ °C} \quad (13.2)$$

$$\lambda = 0,0709 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000083 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,625$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 601 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 528 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 7815,46 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 6813,14 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{16,64} \left(1 + \frac{564,5}{273,15} \right) = 6,41 \text{ m/s} \quad (13.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d \quad (13.4)$$

$$F_{sp} = 6,4 \cdot 3,7 - 62 \cdot 3,57 \cdot 0,0318 = 16,64 \text{ m}^2$$

13.2 Ležatý přehřívák

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0218 m
Příčná rozteč	S ₁	0,1 m
Podélná rozteč	S ₂	0,09 m
Počet trubek v řadě	z	62
Počet řad	z _ř	16
Délka jedné trubky	l _{tr}	3,57 m
Plocha jedné trubky	S _{tr}	0,3567 m ²
Plocha přehříváku	S	365,21 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	355 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	385 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 83,19}{1 + \frac{83,19}{4735,7}} = 53,14 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 69,01 + 14,18 = 83,19 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (13.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0709}{0,0318} \cdot \left(\frac{6,4 \cdot 0,0318}{8,3 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,625^{0,33} = 69,01 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\frac{S_2}{d} \geq 2 \Rightarrow c_s = 1 \quad (13.8)$$

Oprava na počet řad

$$z \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (13.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (13.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,150 \cdot 837^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{703}{837}\right)^4}{1 - \frac{703}{837}} = 14,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro přehříváky $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,163} = 0,150 \quad (13.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (13.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (23,81 \cdot 0,23 + 0,076 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,296 = 0,163$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (13.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,296}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{837}{1000} \right) = 23,81 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{837^2 \cdot 16^2}} = 0,076 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa} \quad (13.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,1 \cdot 0,09}{\pi \cdot 0,0318^2} - 1 \right) = 0,296 \text{ m} \quad (13.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15$$

$$T_z = 370 + 60 + 273,15 = 703 \text{ K} \quad (13.16)$$

Δt - pro přehříváky páry v druhém tahu, spalování uhlí a $t_{st} \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{355 + 385}{2} = 370 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.17)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (13.18)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,087}{0,0218} \cdot \left(\frac{11,01 \cdot 0,0218}{3,78 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,5^{0,4} = 4735,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Látkové vlastnosti média

$$p = 14,31 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,087 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,5$$

Viskozita

$$\nu = 3,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0145 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost páry

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{33,88}{0,0462} \cdot 0,0145 = 11,01 \text{ m/s} \quad (13.19)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot 2 = \frac{\pi \cdot 0,0218^2}{4} \cdot 62 \cdot 2 = 0,0462 \text{ m}^2 \quad (13.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{216 - 173}{\ln\left(\frac{216}{173}\right)} = 193,61 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.21)$$

$$\Delta t_v = 601 - 385 = 216 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 528 - 355 = 173 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.22)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{hl} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{53,14 \cdot 365,21 \cdot 193,61}{3,9 \cdot 1000} = 961,05 \text{ kJ/kg} \quad (13.23)$$

13.3 Stěny druhého tahu v oblasti horního ležatého přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	40,4 m ²

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{29,83} + \frac{1}{3055,6}} = 19,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.24)$$

Součinitel tepelné efektivity pro spalování uhlí podle [1].

$$\psi = 0,65$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 16,22 + 13,61 = 29,83 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.25)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (13.26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0709}{0,143} \cdot \left(\frac{6,4 \cdot 0,143}{8,3 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,625^{0,4} = 16,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 16,64}{3,7 \cdot 2 + 2 \cdot 6,4 + 124 \cdot 3,57} = 0,143 \text{ m} \quad (13.27)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (13.28)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,15 \cdot 837,5^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{681}{837,5}\right)^4}{1 - \frac{681}{837,5}} = 13,61 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (13.2) u výpočtu (13.10) horního ležatého přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (13.29)$$

$$T_z = 347,5 + 60 + 273,15 = 681 \text{ K}$$

Δt - pro přehříváky páry v druhém tahu, spalování uhlí a $t_{st} \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.30)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{247 - 187}{\ln\left(\frac{247}{187}\right)} = 215,52 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.31)$$

$$\Delta t_v = 601 - 354 = 247 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.32)$$

$$\Delta t_m = 528 - 341 = 187 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{Shl} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{19,2 \cdot 40,4 \cdot 215,52}{3,9 \cdot 1000} = 42,76 \text{ kJ/kg} \quad (13.33)$$

13.4 Celková bilance oblasti horního ležatého přehříváku

$$Q_v = Q_{hl} + Q_{Shl} \quad (13.34)$$

$$Q_v = 961,05 + 42,76 = 1003,81 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{995,7 - 1003,81}{995,7} \cdot 100 = -0,81 \% \quad (13.35)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

14 Oblast dolního ležatého přehříváku

Oblast se nachází v druhém tahu kotle mezi horním ležatým přehřívákem a dolním ekonomizérem 2. Hlavní teplosměnnou plochou je dolní ležatý přehřívák. Dále spaliny předávají teplo i stěnám druhého tahu. Pára sem vstupuje ze stěn druhého tahu.

14.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (6813,14 - 6046,74) = 761,34 \text{ kJ/kg} \quad (14.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{528 + 472}{2} = 500 \text{ °C} \quad (14.2)$$

$$\lambda = 0,0708 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000748 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,63$$

Teplota spalin na vstupu

$$t_1 = 528 \text{ °C}$$

Teplota spalin na výstupu

$$t_2 = 472 \text{ °C}$$

Entalpie spalin na vstupu

$$I_1 = 6813,14 \text{ kJ/kg}$$

Entalpie spalin na výstupu

$$I_2 = 6046,74 \text{ kJ/kg}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{16,64} \left(1 + \frac{500}{273,15} \right) = 5,91 \text{ m/s} \quad (14.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d$$

$$F_{sp} = 6,4 \cdot 3,7 - 62 \cdot 3,57 \cdot 0,0318 = 16,64 \text{ m}^2 \quad (14.4)$$

14.2 Ležatý přehřívák

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0238 m
Příčná rozteč	S ₁	0,1 m
Podélná rozteč	S ₂	0,09 m
Počet trubek v řadě	z	62
Počet řad	z _ř	16
Délka jedné trubky	l _{tr}	3,57 m
Plocha jedné trubky	S _{tr}	0,3567 m ²
Plocha přehříváku	S	365,21 m ²
Teplota páry na vstupu	t _{in}	348 °C
Teplota páry na výstupu	t _{out}	355 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 82,39}{1 + \frac{82,39}{3758,33}} = 52,41 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 70,05 + 12,35 = 82,39 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (14.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0708}{0,0318} \cdot \left(\frac{5,91 \cdot 0,0318}{7,48 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,63^{0,33} = 70,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\frac{S_2}{d} \geq 2 \Rightarrow c_s = 1 \quad (14.8)$$

Oprava na počet řad

$$z_{\text{ř}} \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (14.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (14.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,155 \cdot 773^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{685}{773}\right)^4}{1 - \frac{685}{773}} = 12,35 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro přehříváky a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,168} = 0,155 \quad (14.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (14.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (24,63 \cdot 0,23 + 0,08 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,296 = 0,165$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (14.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,296}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{773}{1000} \right) = 24,63 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{773^2 \cdot 16^2}} = 0,08 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa} \quad (14.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \text{ }\mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,1 \cdot 0,09}{\pi \cdot 0,0318^2} - 1 \right) = 0,296 \text{ m} \quad (14.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (14.16)$$

$$T_z = 351,5 + 60 + 273,15 = 685 \text{ K}$$

Δt -pro přehříváky páry v druhém tahu, spalování uhlí a $t_{st} \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{348 + 355}{2} = 351,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.17)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (14.18)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,087}{0,0238} \cdot \left(\frac{8,43 \cdot 0,0238}{3,78 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,5^{0,4} = 4735,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Látkové vlastnosti média

$$p = 14,31 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,087 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 1,5$$

Viskozita

$$\nu = 3,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0145 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Rychlost páry

$$w_m = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{33,88}{0,0552} \cdot 0,0145 = 8,43 \text{ m/s} \quad (14.19)$$

Průřez průchodu páry

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot 2 = \frac{\pi \cdot 0,0238^2}{4} \cdot 62 \cdot 2 = 0,0552 \text{ m}^2 \quad (14.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{173 - 128}{\ln\left(\frac{173}{128}\right)} = 147,14 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.21)$$

$$\Delta t_v = 528 - 355 = 173 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 472 - 348 = 124 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.22)$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{dl} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{52,41 \cdot 365,21 \cdot 147,14}{3,9 \cdot 1000} = 720,28 \text{ kJ/kg} \quad (14.23)$$

14.3 Stěny druhého tahu v oblasti dolního ležatého přehříváku

Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	tl	5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
Teplosměnná plocha	S	40,4 m ²

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,65 \cdot \frac{1}{\frac{1}{28,81} + \frac{1}{3055,6}} = 18,55 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.24)$$

Součinitel tepelné efektivity pro spalování uhlí $\psi = 0,65$ podle [1].

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 16,56 + 12,25 = 28,81 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.25)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (14.26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0708}{0,143} \cdot \left(\frac{5,91 \cdot 0,143}{7,48 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,63^{0,4} = 16,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Hydraulický průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 16,64}{3,7 \cdot 2 + 2 \cdot 6,4 + 124 \cdot 3,57} = 0,143 \text{ m} \quad (14.27)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (14.28)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,155 \cdot 773^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{681}{773}\right)^4}{1 - \frac{681}{773}} = 12,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Stupeň černosti proudu spalin, optická hustota spalin, součinitel zeslabení tříatomovými plyny a efektivní tloušťka sálavé vrstvy - všechny tyto hodnoty jsou totožné jako v předchozí kapitole (14.2) u výpočtu (14.10) dolního ležatého přehříváku.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (14.29)$$

$$T_z = 347,5 + 60 + 273,15 = 681 \text{ K}$$

Δt - pro přehříváky páry v druhém tahu, spalování uhlí a $t_{st} \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{341 + 354}{2} = 347,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.30)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{174 - 131}{\ln\left(\frac{174}{131}\right)} = 151,48 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.31)$$

$$\Delta t_v = 528 - 354 = 74 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.32)$$

$$\Delta t_m = 472 - 341 = 131 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{sdl} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{18,55 \cdot 40,4 \cdot 151,48}{3,9 \cdot 1000} = 29,04 \text{ kJ/kg} \quad (14.33)$$

14.4 Celková bilance oblasti dolního ležatého přehříváku

$$Q_v = Q_{dl} + Q_{sdl} \quad (14.34)$$

$$Q_v = 720,28 + 29,04 = 749,32 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{761,34 - 749,32}{761,34} \cdot 100 = 1,58 \% \quad (14.35)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

15 Oblast ekonomizéru 2

Oblast se nachází v druhém tahu kotle mezi dolním ležatým přehřívákem a původním ekonomizérem 1. Jedinou teplosměnnou plochou je zde ekonomizér 2. Voda sem vstupuje z ekonomizéru 1.

15.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (6046,74 - 4891,47) = 1147,63 \text{ kJ/kg} \quad (15.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{472 + 387}{2} = 429,5 \text{ °C} \quad (15.2)$$

$$\lambda = 0,0595 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000658 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,635$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 472 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 387 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 6046,74 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 4891,47 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{12,38} \left(1 + \frac{430}{273,15} \right) = 7,23 \text{ m/s} \quad (15.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d \quad (15.4)$$

$$F_{sp} = 6,394 \cdot 3,694 - 56 \cdot 6,314 \cdot 0,0318 = 12,38 \text{ m}^2$$

15.2 EKO 2

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0238 m
Příčná rozteč	S ₁	0,065 m
Podélná rozteč	S ₂	0,09 m
Počet trubek v řadě	z	56
Počet řad	z _ř	14
Délka jedné trubky	l _{tr}	6,314 m
Plocha přehříváku	S	494,54 m ²
Teplota vody na vstupu	t _{in}	260 °C
Teplota vody na výstupu	t _{out}	290 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 91,14 = 59,24 \text{ W/m}^2 \text{K} \quad (15.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 84,23 + 6,91 = 91,14 \text{ W/m}^2 \text{K} \quad (15.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{v} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (15.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0595}{0,0318} \cdot \left(\frac{7,32 \cdot 0,0318}{6,58 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,635^{0,33} = 84,23 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\frac{S_2}{d} \geq 2 \Rightarrow c_s = 1 \quad (15.8)$$

Oprava na počet řad

$$z_{\text{ř}} \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (15.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (15.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,128 \cdot 703^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{573}{703} \right)^4}{1 - \frac{573}{703}} = 6,91 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,138} = 0,128 \quad (15.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (15.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (32,75 \cdot 0,23 + 0,0857 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,182 = 0,138$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (15.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,182}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{703}{1000} \right) = 32,75 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{703^2 \cdot 16^2}} = 0,0857 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (15.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,065 \cdot 0,09}{\pi \cdot 0,0318^2} - 1 \right) = 0,182 \text{ } m \quad (15.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (15.16)$$

$$T_z = 275 + 25 + 273,15 = 573 \text{ } K$$

Δt -pro ekonomizéry dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{260 + 290}{2} = 275 \text{ } ^\circ C \quad (15.17)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{182 - 127}{\ln\left(\frac{182}{127}\right)} = 152,68 \text{ } ^\circ C \quad (15.18)$$

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 472 - 290 = 182 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 387 - 260 = 127 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{15.19}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{eko2} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{59,24 \cdot 494,54 \cdot 152,68}{3,9 \cdot 1000} = 1144,15 \text{ kJ/kg}\tag{15.20}$$

15.3 Celková bilance ekonomizéru 2

$$\begin{aligned}Q_v &= Q_{eko2} \\ Q_v &= 1144,15 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\tag{15.21}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1147,63 - 1144,15}{1147,63} \cdot 100 = 0,3 \text{ }\%\tag{15.22}$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

16 Oblast ekonomizéru 1

Oblast se původně nacházela v druhém tahu kotle za ekonomizérem 2. Nyní oblast přesuneme za denitrifikační reaktor, ve kterém nedochází k ochlazení spalin. Jedinou teplosměnnou plochou v oblasti je ekonomizér 1, do něhož vstupuje napájecí voda.

16.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (4891,47 - 4121,16) = 765,22 \text{ kJ/kg} \quad (16.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{387 + 328}{2} = 358 \text{ °C} \quad (16.2)$$

$$\lambda = 0,0533 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000547 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,645$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 387 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 328 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 4891,47 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 4121,16 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{12,38} \left(1 + \frac{358}{273,15} \right) = 6,49 \text{ m/s} \quad (16.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = a \cdot b - z \cdot l \cdot d$$

$$F_{sp} = 6,394 \cdot 3,694 - 56 \cdot 6,314 \cdot 0,0318 = 12,38 \text{ m}^2 \quad (16.4)$$

16.2 EKO 1

Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	tl	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,0238 m
Příčná rozteč	S ₁	0,065 m
Podélná rozteč	S ₂	0,09 m
Počet trubek v řadě	z	56
Počet řad	z _ř	14
Délka jedné trubky	l _{tr}	6,314 m
Plocha přehříváku	S	494,54 m ²
Teplota vody na vstupu	t _{in}	230 °C
Teplota vody na výstupu	t _{out}	260 °C

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 82,78 = 53,81 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (16.5)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 79,7 + 3,08 = 82,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (16.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (16.7)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0533}{0,0318} \cdot \left(\frac{6,49 \cdot 0,0318}{5,47 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,645^{0,33} = 77,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\frac{S_2}{d} \geq 2 \Rightarrow c_s = 1 \quad (16.8)$$

Oprava na počet řad

$$z_{\bar{r}} \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (16.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (16.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,133 \cdot 631^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{543}{631} \right)^4}{1 - \frac{543}{631}} = 5,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,143} = 0,133 \quad (16.11)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (16.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (33,93 \cdot 0,23 + 0,092 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,182 = 0,143$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítlivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (16.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,182}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{631}{1000} \right) = 33,93 \text{ } 1/m \cdot MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{631^2 \cdot 16^2}} = 0,092 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (16.14)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,065 \cdot 0,09}{\pi \cdot 0,0318^2} - 1 \right) = 0,182 m \quad (16.15)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 \quad (16.16)$$

$$T_z = 245 + 25 + 273,15 = 543 \text{ } K$$

Δt - pro ekonomizéry dle [1]

Teplota média

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{230 + 260}{2} = 245 \text{ } ^\circ C \quad (16.17)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{127 - 98,5}{\ln\left(\frac{127}{98,5}\right)} = 111,9 \text{ } ^\circ C \quad (16.18)$$

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 387 - 260 = 127 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 328 - 230 = 98,5 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{16.19}$$

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{eko1} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{53,81 \cdot 494,54 \cdot 111,9}{3,9 \cdot 1000} = 761,56 \text{ kJ/kg}\tag{16.20}$$

16.3 Celková bilance ekonomizéru 1

$$\begin{aligned}Q_v &= Q_{eko1} \\ Q_v &= 761,56 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\tag{16.21}$$

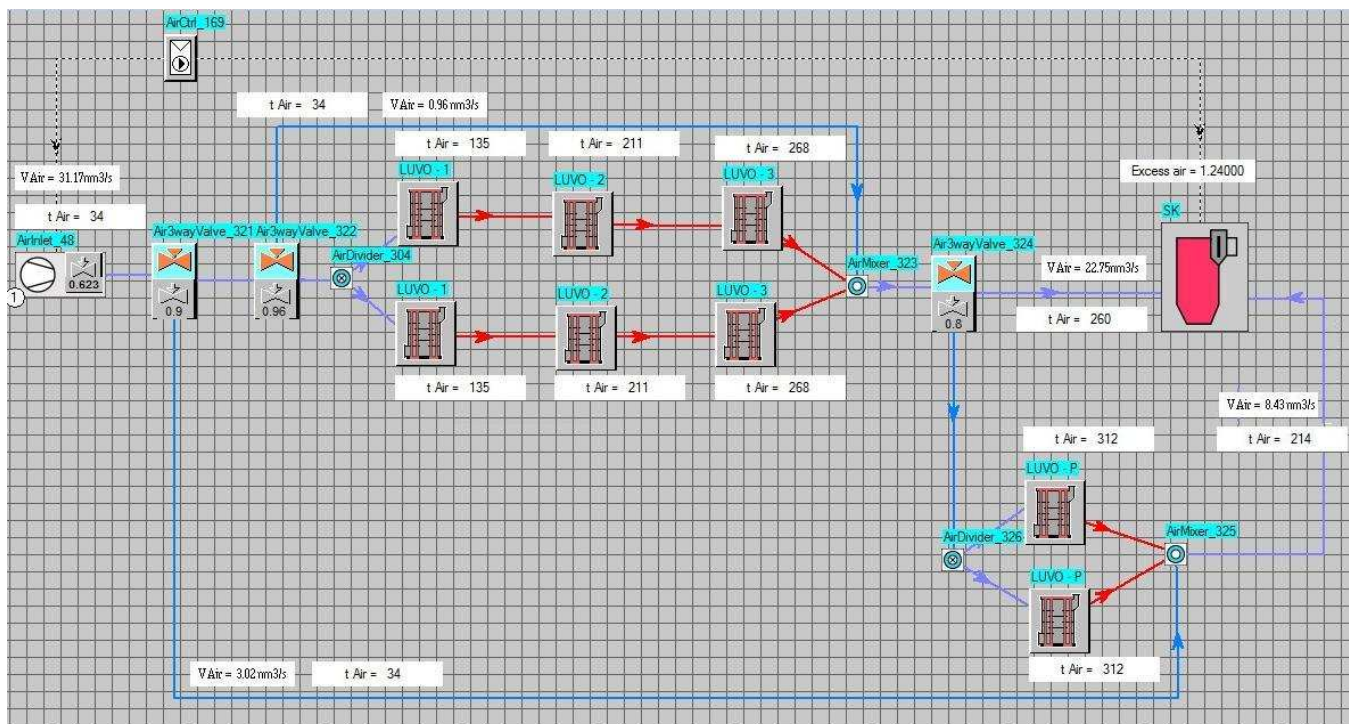
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{765,22 - 761,56}{765,22} \cdot 100 = 0,48 \text{ }\%\tag{16.22}$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

17 Bilance ohříváků vzduchu

Ve třetím tahu kotle jsou ve dvoutahovém uspořádání umístěny ohříváky vzduchu, které jsou rekuperační a trubkové. Teplosměnnou plochu ohřivačů tvoří hladké trubky zavařené do trubkovnic. Spaliny proudí uvnitř trubek. Ohříváky jsou uspořádány dle schématu na obr. 17.1. Sekundární a terciální spalovací vzduch je ohříván v ohřívácích LUVO 1 až 3, které jsou sériově řazené, přičemž každý stupeň tvoří dvě paralelně zapojené sekce. Ohřivač primárního vzduchu je řazený jako 4. stupeň ohřivače vzduchu.



Obr. 17.1 Ohříváky vzduchu [5]

18 Oblast LUVO P

18.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (4121,16 - 4030,81) = 89,76 \text{ kJ/kg} \quad (18.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{328 + 321}{2} = 324,5 \text{ °C} \quad (18.2)$$

$$\lambda = 0,0501 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000492 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,6477$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 328 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 321 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 4121,16 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 4030,81 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{8,39} \left(1 + \frac{324,5}{273,15} \right) = 9,08 \text{ m/s} \quad (18.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = \pi \cdot d \cdot z \cdot z_r \cdot 2 = \pi \cdot 0,037 \cdot 52 \cdot 75 \cdot 2 = 8,39 \text{ m}^2 \quad (18.4)$$

18.2 LUVO P

Vnější průměr trubky	D	0,04 m
Tloušťka stěny	tl	1,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,037 m
Příčná rozteč	S_1	0,066 m
Podélná rozteč	S_2	0,0415 m
Počet trubek v řadě	z	52
Počet řad	z_r	75
Délka jedné trubky	l_{tr}	0,707 m
Plocha ohříváku	S	692,99 m ²
Teplota vzduchu na vstupu	t_{in}	260 °C
Teplota vzduchu na výstupu	t_{out}	312 °C
Množství vzduchu	V_{vz}	2,81 m ³ /s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{33,10 \cdot 55,51}{33,10 + 55,51} = 17,63 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.5)$$

Součinitel využití ξ pro trubkové ohříváky vzduchu dle [1].

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 30,56 + 2,54 = 33,10 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (18.7)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0501}{0,037} \cdot \left(\frac{9,08 \cdot 0,037}{4,92 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6477^{0,4} = 30,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (18.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0608 \cdot 598^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{578}{598} \right)^4}{1 - \frac{578}{598}} = 2,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,0627} = 0,0608 \quad (18.9)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (18.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (81,6 \cdot 0,23 + 0,095 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,0333 = 0,0627$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (18.11)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,0333}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{598}{1000} \right) = 81,6 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{598^2 \cdot 16^2}} = 0,095 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (18.12)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,038 = 0,0333 \text{ } m \quad (18.13)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = \frac{t_{sp} + t}{2} + 273,15 = \frac{324,5 + 286}{2} + 273,15 = 578 \text{ } K \quad (18.14)$$

Teplota média a jeho látkové vlastnosti

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{260 + 312}{2} = 286 \text{ } ^\circ C \quad (18.15)$$

$$\lambda = 0,0451 \text{ } W/mK$$

$$Pr = 0,727$$

$$\nu = 4,63 \cdot 10^{-5} \text{ } m^2/s$$

Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu pro vystřídání uspořádání

$$\alpha_2 = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (18.16)$$

$$\alpha_2 = 0,389 \cdot 1 \cdot \frac{0,0451}{0,04} \cdot \left(\frac{4,4 \cdot 0,04}{4,63 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,727^{0,33} = 55,51 \text{ } W/m^2 K$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{66}{40} = 1,65$$

$$\sigma_2 = \frac{41,5}{40} = 1,0375$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,65^2 + 1,0375^2} = 1,33 \quad (18.17)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{1,65 - 1}{1,33 - 1} = 1,997$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,997^{0,1} = 0,389$$

Oprava na počet řad

$$z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (18.18)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{f} \cdot \left(1 + \frac{t}{273,15}\right) = \frac{2,81}{1,31} \cdot \left(1 + \frac{286}{273,15}\right) = 4,4 \text{ m/s} \quad (18.19)$$

Průřez průchodu vzduchu

$$f = l \cdot (a - z \cdot D) = 0,707 \cdot (3,93 - 52 \cdot 0,04) = 1,31 \text{ m}^2 \quad (18.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = 0,96 \cdot \frac{68 - 9}{\ln\left(\frac{68}{9}\right)} = 28,71 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18.21)$$

$$\Delta t_v = 328 - 260 = 68 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 321 - 312 = 9 \text{ }^\circ\text{C}$$

(18.22)

Součinitel ψ

$$P = \frac{\tau_m}{t_1 - t_m} = \frac{328 - 312}{328 - 260} = 0,239 \quad (18.23)$$

$$P = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{321 - 260}{328 - 312} = 3,77 \quad (18.24)$$

Pro hodnoty P a R vyplývá z mamogramu dle [1] součinitel $\psi=0,96$.

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{LUVOP} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{17,63 \cdot 692,99 \cdot 28,71}{3,9 \cdot 1000} = 89,7 \text{ kJ/kg} \quad (18.25)$$

18.3 Celková bilance LUVO P

$$Q_v = Q_{LUVOP}$$

$$Q_v = 89,7 \text{ kJ/kg}$$

(18.26)

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{89,76 - 89,7}{89,76} \cdot 100 = 0,06 \text{ \%} \quad (18.27)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

19 Oblast LUVO 3

19.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (4030,81 - 3524,71) = 502,76 \text{ kJ/kg} \quad (19.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{321 + 283}{2} = 302 \text{ °C} \quad (19.2)$$

$$\lambda = 0,0482 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,000046 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,6499$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 321 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 283 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 4030,81 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 3524,71 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{8,39} \left(1 + \frac{302}{273,15} \right) = 8,73 \text{ m/s} \quad (19.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = \pi \cdot d \cdot z \cdot z_r \cdot 2 = \pi \cdot 0,037 \cdot 52 \cdot 75 \cdot 2 = 8,39 \text{ m}^2 \quad (19.4)$$

19.2 LUVO 3

Vnější průměr trubky	D	0,04 m
Tloušťka stěny	tl	1,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,037 m
Příčná rozteč	S_1	0,066 m
Podélná rozteč	S_2	0,0415 m
Počet trubek v řadě	z	52
Počet řad	z_r	75
Délka jedné trubky	l	2,407 m
Plocha ohříváku	S	2359,29 m ²
Teplota vzduchu na vstupu	t_{in}	211 °C
Teplota vzduchu na výstupu	t_{out}	268 °C
Množství vzduchu	V_{vz}	14,14 m ³ /s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{32,34 \cdot 67,52}{32,34 + 67,52} = 18,59 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.5)$$

Součinitel využití ξ pro trubkové ohříváky vzduchu dle [1].

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 30,13 + 2,21 = 32,34 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (19.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (19.7)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0482}{0,037} \cdot \left(\frac{8,73 \cdot 0,037}{4,6 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6499^{0,4} = 30,13 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (19.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0614 \cdot 575^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{544}{575} \right)^4}{1 - \frac{544}{575}} = 2,21 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,0634} = 0,0614 \quad (19.9)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (19.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (82,49 \cdot 0,23 + 0,098 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,0333 = 0,0634$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (19.11)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,0333}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{575}{1000} \right) = 82,49 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{575^2 \cdot 16^2}} = 0,098 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (19.12)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,038 = 0,0333 \text{ } m \quad (19.13)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = \frac{t_{sp} + t}{2} + 273,15 = \frac{302 + 239,5}{2} + 273,15 = 544 \text{ } K \quad (19.14)$$

Teplota média a jeho látkové vlastnosti

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{211 + 268}{2} = 239,5 \text{ } ^\circ C \quad (19.15)$$

$$\lambda = 0,042 \text{ } W/mK$$

$$Pr = 0,727$$

$$\nu = 4,009 \cdot 10^{-5} \text{ } m^2/s$$

Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu pro vystřídané uspořádání

$$\alpha_2 = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (19.16)$$

$$\alpha_2 = 0,389 \cdot 1 \cdot \frac{0,042}{0,04} \cdot \left(\frac{5,96 \cdot 0,04}{4,009 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,727^{0,33} = 67,52 \text{ } W/m^2 K$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{66}{40} = 1,65$$

$$\sigma_2 = \frac{41,5}{40} = 1,0375$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,65^2 + 1,0375^2} = 1,33 \quad (19.17)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{1,65 - 1}{1,33 - 1} = 1,997$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,997^{0,1} = 0,389$$

Oprava na počet řad

$$z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (19.18)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{f} \cdot \left(1 + \frac{t}{273,15}\right) = \frac{14,14}{4,45} \cdot \left(1 + \frac{239,5}{273,15}\right) = 5,96 \text{ m/s} \quad (19.19)$$

Průřez průchodu vzduchu

$$f = l \cdot (a - z \cdot D) = 2,407 \cdot (3,93 - 52 \cdot 0,04) = 4,45 \text{ m}^2 \quad (19.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = 0,937 \cdot \frac{110 - 15}{\ln\left(\frac{110}{15}\right)} = 44,38 \text{ }^\circ\text{C} \quad (19.21)$$

$$\Delta t_v = 321 - 211 = 110 \text{ }^\circ\text{C} \quad (19.22)$$

$$\Delta t_m = 283 - 268 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel ψ

$$P = \frac{\tau_m}{t_1 - t_{in}} = \frac{321 - 268}{321 - 211} = 0,484 \quad (19.23)$$

$$P = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{283 - 211}{321 - 268} = 1,34 \quad (19.24)$$

Pro hodnoty P a R vyplývá z mamogramu dle [1] součinitel $\psi = 0,937$.

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{LUVO3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{18,59 \cdot 2359,29 \cdot 44,38}{3,9 \cdot 1000} = 497,79 \text{ kJ/kg} \quad (19.25)$$

19.3 Celková bilance LUVO 3

$$Q_v = Q_{LUVO3} \quad (19.26)$$

$$Q_v = 497,79 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{502,76 - 497,79}{502,76} \cdot 100 = 0,99 \% \quad (19.27)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

20 Oblast LUVO 2

20.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (3524,71 - 2879,57) = 640,88 \text{ kJ/kg} \quad (20.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{283 + 232}{2} = 257,5 \text{ °C} \quad (20.2)$$

$$\lambda = 0,0445 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000401 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,6587$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 283 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 232 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 3524,71 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 2879,57 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{8,39} \left(1 + \frac{257,5}{273,15} \right) = 8,05 \text{ m/s} \quad (20.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = \pi \cdot d \cdot z \cdot z_r \cdot 2 = \pi \cdot 0,037 \cdot 52 \cdot 75 \cdot 2 = 8,39 \text{ m}^2 \quad (20.4)$$

20.2 LUVO 2

Vnější průměr trubky	D	0,04 m
Tloušťka stěny	tl	1,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,037 m
Příčná rozteč	S_1	0,066 m
Podélná rozteč	S_2	0,0415 m
Počet trubek v řadě	z	52
Počet řad	z_r	75
Délka jedné trubky	l	2,407 m
Plocha ohříváku	S	2359,29 m ²
Teplota vzduchu na vstupu	t_{in}	135 °C
Teplota vzduchu na výstupu	t_{out}	211 °C
Množství vzduchu	V_{vz}	14,14 m ³ /s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{30,93 \cdot 63,74}{30,93 + 63,74} = 17,70 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.5)$$

Součinitel využití ξ pro trubkové ohříváky vzduchu dle [1].

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 29,22 + 1,70 = 30,93 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (20.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (20.7)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0445}{0,037} \cdot \left(\frac{8,05 \cdot 0,037}{4,01 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6587^{0,4} = 29,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (20.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0626 \cdot 530^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{488}{530} \right)^4}{1 - \frac{488}{530}} = 1,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,0647} = 0,0626 \quad (20.9)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (20.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (84,22 \cdot 0,23 + 0,103 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,0333 = 0,0647$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (20.11)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,0333}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{530}{1000} \right) = 84,22 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{530^2 \cdot 16^2}} = 0,103 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (20.12)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,038 = 0,0333 \text{ } m \quad (20.13)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = \frac{t_{sp} + t}{2} + 273,15 = \frac{257,5 + 173}{2} + 273,15 = 488 \text{ } K \quad (20.14)$$

Teplota média a jeho látkové vlastnosti

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{135 + 211}{2} = 173 \text{ } ^\circ C \quad (20.15)$$

$$\lambda = 0,0374 \text{ } W/mK$$

$$Pr = 0,727$$

$$\nu = 3,161 \cdot 10^{-5} \text{ } m^2/s$$

Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu pro vystřídání uspořádání

$$\alpha_2 = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (20.16)$$

$$\alpha_2 = 0,389 \cdot 1 \cdot \frac{0,0374}{0,04} \cdot \left(\frac{5,19 \cdot 0,04}{3,161 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,727^{0,33} = 63,74 \text{ } W/m^2 K$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{66}{40} = 1,65$$

$$\sigma_2 = \frac{41,5}{40} = 1,0375$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,65^2 + 1,0375^2} = 1,33 \quad (20.17)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{1,65 - 1}{1,33 - 1} = 1,997$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,997^{0,1} = 0,389$$

Oprava na počet řad

$$z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (20.18)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{f} \cdot \left(1 + \frac{t}{273,15}\right) = \frac{14,14}{4,45} \cdot \left(1 + \frac{173}{273,15}\right) = 5,19 \text{ m/s} \quad (20.19)$$

Průřez průchodu vzduchu

$$f = l \cdot (a - z \cdot D) = 2,407 \cdot (3,93 - 52 \cdot 0,04) = 4,45 \text{ m}^2 \quad (20.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = 0,925 \cdot \frac{148 - 21}{\ln\left(\frac{148}{21}\right)} = 60,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (20.21)$$

$$\Delta t_v = 283 - 135 = 148 \text{ }^\circ\text{C} \quad (20.22)$$

$$\Delta t_m = 232 - 211 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel ψ

$$P = \frac{\tau_m}{t_1 - t_{in}} = \frac{283 - 211}{283 - 135} = 0,485 \quad (20.23)$$

$$P = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{232 - 135}{283 - 211} = 1,35 \quad (20.24)$$

Pro hodnoty P a R vyplývá z mamogramu dle [1] součinitel $\psi=0,925$.

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{LUVO2} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{70 \cdot 2359,29 \cdot 60,35}{3,9 \cdot 1000} = 644,58 \text{ kJ/kg} \quad (20.25)$$

20.3 Celková bilance LUVO 2

$$Q_v = Q_{LUVO2} \quad (20.26)$$

$$Q_v = 644,58 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{640,88 - 644,58}{640,88} \cdot 100 = -0,58 \text{ \%} \quad (20.27)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

21 Oblast LUVO 1

21.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (2879,57 - 2041,73) = 832,31 \text{ kJ/kg} \quad (21.1)$$

Střední teplota spalin a jejich vlastnosti

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{232 + 166}{2} = 199 \text{ °C} \quad (21.2)$$

$$\lambda = 0,0396 \text{ W/mK}$$

$$\nu = 0,0000326 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,6704$$

Teplota spalin na vstupu	$t_1 = 232 \text{ °C}$
Teplota spalin na výstupu	$t_2 = 166 \text{ °C}$
Entalpie spalin na vstupu	$I_1 = 2879,57 \text{ kJ/kg}$
Entalpie spalin na výstupu	$I_2 = 2041,73 \text{ kJ/kg}$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \left(1 + \frac{t_{st}}{273,15} \right) = \frac{3,9 \cdot 8,89}{8,39} \left(1 + \frac{199}{273,15} \right) = 7,17 \text{ m/s} \quad (21.3)$$

Světlý průřez spalinového kanálu

$$F_{sp} = \pi \cdot d \cdot z \cdot z_r \cdot 2 = \pi \cdot 0,037 \cdot 52 \cdot 75 \cdot 2 = 8,39 \text{ m}^2 \quad (21.4)$$

21.2 LUVO 1

Vnější průměr trubky	D	0,04 m
Tloušťka stěny	tl	1,5 mm
Vnitřní průměr trubky	d	0,037 m
Příčná rozteč	S_1	0,066 m
Podélná rozteč	S_2	0,0415 m
Počet trubek v řadě	z	52
Počet řad	z_r	75
Délka jedné trubky	l	2,407 m
Plocha ohříváku	S	2359,29 m ²
Teplota vzduchu na vstupu	t_{in}	34 °C
Teplota vzduchu na výstupu	t_{out}	135 °C
Množství vzduchu	V_{vz}	14,14 m ³ /s

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{29,39 \cdot 58,21}{29,39 + 58,21} = 16,60 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.5)$$

Součinitel využití ξ pro trubkové ohříváky vzduchu dle [1].

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 28,23 + 1,16 = 29,39 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (21.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (21.7)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0396}{0,037} \cdot \left(\frac{7,17 \cdot 0,037}{3,26 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6704^{0,4} = 28,23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (21.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0643 \cdot 472^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{415}{472} \right)^4}{1 - \frac{415}{472}} = 1,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Stupeň černosti povrchu pro ekonomizéry a spalování černého uhlí $a_{st} = 0,8$.

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,0664} = 0,0643 \quad (21.9)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (21.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (86,48 \cdot 0,23 + 0,112 \cdot 0,099) \cdot 0,1 \cdot 0,0333 = 0,0664$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (21.11)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0914}{3,16 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 0,0333}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{472}{1000} \right) = 86,48 \text{ 1/m} \cdot \text{MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{43}{\sqrt{T^2 \cdot d^2}} = \frac{43}{\sqrt{472^2 \cdot 16^2}} = 0,112 \text{ } 1/m \cdot MPa \quad (21.12)$$

Střední efektivní průměr popílkových částic $d = 16 \mu m$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,038 = 0,0333 \text{ } m \quad (21.13)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = \frac{t_{sp} + t}{2} + 273,15 = \frac{199 + 84,5}{2} + 273,15 = 415 \text{ } K \quad (21.14)$$

Teplota média a jeho látkové vlastnosti

$$t = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{34 + 135}{2} = 84,5 \text{ } ^\circ C \quad (21.15)$$

$$\lambda = 0,0309 \text{ } W/mK$$

$$Pr = 0,727$$

$$\nu = 2,149 \cdot 10^{-5} \text{ } m^2/s$$

Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu pro vystřídané uspořádání

$$\alpha_2 = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (21.16)$$

$$\alpha_2 = 0,389 \cdot 1 \cdot \frac{0,0309}{0,04} \cdot \left(\frac{4,16 \cdot 0,04}{2,149 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,727^{0,33} = 28,21 \text{ } W/m^2 K$$

Oprava na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{66}{40} = 1,65$$

$$\sigma_2 = \frac{41,5}{40} = 1,0375$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,65^2 + 1,0375^2} = 1,33 \quad (21.17)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_3 - 1} = \frac{1,65 - 1}{1,33 - 1} = 1,997$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,997^{0,1} = 0,389$$

Oprava na počet řad

$$z_2 \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (21.18)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{f} \cdot \left(1 + \frac{t}{273,15}\right) = \frac{14,14}{4,45} \cdot \left(1 + \frac{84,5}{273,15}\right) = 4,16 \text{ m/s} \quad (21.19)$$

Průřez průchodu vzduchu

$$f = l \cdot (a - z \cdot D) = 2,407 \cdot (3,93 - 52 \cdot 0,04) = 4,45 \text{ m}^2 \quad (21.20)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = 0,92 \cdot \frac{198 - 31}{\ln\left(\frac{198}{31}\right)} = 82,94 \text{ }^\circ\text{C} \quad (21.21)$$

$$\Delta t_v = 232 - 34 = 198 \text{ }^\circ\text{C} \quad (21.22)$$

$$\Delta t_m = 166 - 135 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel ψ

$$P = \frac{\tau_m}{t_1 - t_{in}} = \frac{232 - 135}{232 - 34} = 0,491 \quad (21.23)$$

$$P = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{166 - 34}{232 - 135} = 1,357 \quad (21.24)$$

Pro hodnoty P a R vyplývá z mamogramu dle [1] součinitel $\psi=0,92$.

Rovnice sdílení tepla

$$Q_{LUVOI} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{16,60 \cdot 2359,29 \cdot 82,94}{3,9 \cdot 1000} = 830,70 \text{ kJ/kg} \quad (21.25)$$

21.3 Celková bilance LUVO 1

$$Q_v = Q_{LUVOI} \quad (21.26)$$

$$Q_v = 830,70 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{832,31 - 830,70}{832,31} \cdot 100 = 0,19 \text{ \%} \quad (21.27)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto lze považovat teplotu odchozích spalin za správnou.

22 Celková bilance kotle

Celková bilance se provádí na straně spalin. Odchylka od celkového přivedeného tepla nesmí být větší než 0,5 %.

$$\Delta Q_{cel} = Q_p^p \cdot \eta_k - \sum Q_i = 22608,7 \cdot 0,9024 - 20426,37 = -24,04 \text{ kJ/kg} \quad (22.1)$$

Teplo odevzdané ve všech výhřevných plochách na straně spalin

$$\sum Q_i = \varphi \cdot (I_u - I_{EK01}) = 0,993 \cdot (24774,21 - 4121,16) = 20426,37 \text{ kJ/kg} \quad (22.2)$$

Celková odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q_{cel}}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{-24,04}{22608,7} \cdot 100 = -0,106 \% \quad (22.3)$$

23 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo provést kontrolní tepelný výpočet, na základě výsledků navrhnout umístění selektivní katalytické redukce do spalínovodu kotle o teplotním poli spalin 400-310 °C a tím splnit požadavek dodržení emisního limitu $\text{NO}_x=200 \text{ mg/Nm}^3$.

Nejprve jsem ve výpočtu kotle provedl stechiometrické výpočty. Tím jsem zjistil potřebné množství vzduchu ke spalování a množství vyprodukovaných spalin. Ve výpočtech jsem vycházel ze zadaného složení garantovaného černého uhlí a jeho výhřevností. Dále jsem vypočítal tepelné ztráty kotle a určil tepelnou účinnost $\eta=90,24 \%$, množství paliva $M_p=4,33 \text{ kg/s}$ a výrobní teplo páry $Q_v=88,39 \text{ MW}$. Při výpočtu výkonů výhřevných ploch jsem vycházel z konstrukčního výkresu a informací poskytnutých od konzultanta Ing. Jaroslava Studničky z firmy PROVYKO. Kotel jsem rozdělil na pomyslné oblasti, které jsem přepočítával postupně od spalovací komory až po ohříváky vzduchu. Většina stanovených oblastí obsahuje několik paralelně řazených ploch, proto jsou výpočty dosti obsáhlé. Cílem výpočtu každé oblasti bylo zjistit odchozí teplotu spalin dané oblasti, která sloužila jako vstupní hodnota pro výpočet oblasti následující. Hodnoty tepelných výkonů z bilance spalin a přenosu tepla z ploch v dané oblasti musí splňovat toleranci. Pro přehříváky, ekonomizér a ohřívák vzduchu jsou tolerance $\pm 2\%$ a pro mříž $\pm 5\%$. Celková odchylka bilance kotle pak nesmí přesáhnout $\pm 0,5 \%$. Při výpočtu byly veškeré tyto hodnoty dodrženy.

Z výsledků výpočtů tedy vyplynulo, že vhodné umístění SCR reaktoru je mezi ekonomizérem 2 a ekonomizérem 1, kde je teplota spalin 387°C. Katalyzátor kvůli jeho velkým rozměrům umístíme mimo stávající spalinový trakt kotle. Spalínovod vedeme z výstupu ekonomizér 2 do SCR reaktoru. Na výstup ze SCR reaktoru přesuneme ekonomizér 1 a spaliny navedeme do stávajícího třetího tahu kotle, který obsahuje ohříváky vzduchu. V SCR reaktoru nedochází k ochlazením spalin, takže nemusíme přepočítávat výkony teplosměnných ploch nacházejících se za SCR. Změny uspořádání kotle s umístěním SCR reaktoru jsou zakresleny v přiloženém výkresu. Toto umístění katalyzátoru bude splňovat požadované emisní limity NO_x při všech provozních režimech.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Budaj, F.: Parní kotle podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT, Brno 1992
 [2] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skriptum ČVUT, Praha 1999
 [3] Software Microsoft Office Excel 2010
 [4] Software XSteam – IAPWS IF97 Excel Steam Tables by Magnus Holmgren
 [5] Software CyclePad

Seznam použitých symbolů

a, b, c	m	rozměr spalinového kanálu
a	-	stupeň černosti plamene
a_0	-	stupeň černosti ohniště
a_{st}	-	stupeň černosti povrchu stěn
a_{pl}	-	efektivní stupeň černosti plamene
a_{sv}	-	stupeň černosti svítivé části plamene
a_{ns}	-	stupeň černosti nesvítivé části plamene
Bo	-	Boltzmanovo číslo
c	kJ/kgK	měrné teplo
c_s	-	oprava svazku
c_z	-	oprava na počet podélných řad
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}	m^2	světlý průřez kanálu
$F_{ús}$	m^2	účinná sálavá plocha
F_{st}	m^2	povrch stěn
h_k	m	výška hořáku
h_c	m	výška ohniště
i_p	kJ/kg	fyzické teplo paliva
i_{pp}	kJ/kg	entalpie přehřáté páry
i_{nv}	kJ/kg	entalpie napájecí vody
Δi	kJ/kg	rozdíl entalpií
i_1	kJ/kg	entalpie média na vstupu
i_2	kJ/kg	entalpie média na výstupu
I_0	kJ/kg	entalpie spalin na konci ohniště
I_1	kJ/kg	vstupní entalpie spalin
I_2	kJ/kg	výstupní entalpie spalin
I_u	kJ/kg	užitečné teplo uvolněné v ohništi
ISP_{pod}	kJ/kg	entalpie spalin na konci kotle
ISP	kJ/kg	entalpie spalin
ISP_{min}	kJ/kg	minimální entalpie spalin
ISP_r	kJ/kg	entalpie spalin s recirkulací
I_{vz}	kJ/kg	entalpie vzduchu
I_{vzmin}	kJ/kg	minimální entalpie vzduchu
k	W/kgK	součinitel prostupu tepla

k_{sp}	$1/mMPa$	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
k_c	$1/mMPa$	součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
l_{tl}	m	délka trubky
M	-	součinitel (výpočet ohniště)
M_{pv}, M_p	kg/s	množství paliva
M_{pp}	kg/s	množství přehřáté páry
M_{nv}	kg/s	množství napájecí vody
M_o	kg/s	množství odluhu
M_{op}	kg/s	množství odběru páry
M_{mp}	kg/s	množství do mezipřehříváku páry
n_{tr}	-	počet trubek
n_1, n_2	-	počet hořáků
O	m	obvod průřezu kanálu
OSP_{min}	m^3/kg	minimální množství spalin
OSP	m^3/kg	skutečné množství spalin
OSP_{od}	m^3/kg	množství spalin na výstupu kotle
OSP_r	m^3/kg	množství spalin s recirkulací spalin
O_r	m^3/kg	množství recirkulovaných spalin
OVZ_{min}	m^3/kg	minimální objem vlhkého vzduchu
OVZ	m^3/kg	skutečné množství vzduchu
$OSP.C$	kJ/kgK	střední celkové měrné teplo spalin
p	MPa	tlak
p_{nv}	MPa	tlak napájecí vody
p_{SP}	MPa	celkový parciální tlak
Pr	-	Prandtlovo číslo
Q_b	kJ/kg	bilanční teplo
Q_v	kJ/kg	teplo ze sdílení tepla spalin a média
Q_p	kJ/kg	teplo přivedené do kotle
Q_i	kJ/kg	výhřevnost paliva
Q_{vzv}	kJ/kg	teplo přivedené vzduchem
Q_s	kJ/kg	množství tepla odevzdané v ohništi do stěn
q	kW/m^2	střední tepelné zatížení stěn ohniště
q_v	kW/m^3	objemové zatížení ohniště
r	-	koeficient recirkulace
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 sálavé vrstvy
S	m^2	výhřevná plocha
S_1	m	příčná rozteč
S_2	m	podélná rozteč
t	$^{\circ}C$	teplota
t_1	$^{\circ}C$	vstupní teplota spalin
t_2	$^{\circ}C$	výstupní teplota spalin
t_{in}	$^{\circ}C$	vstupní teplota média
t_{out}	$^{\circ}C$	výstupní teplota média
t_{st}	$^{\circ}C$	střední teplota spalin
t_z	$^{\circ}C$	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
Δt	$^{\circ}C$	teplotní spád
Δt_m	$^{\circ}C$	menší rozdíl teplot

Δt_v	$^{\circ}\text{C}$	větší rozdíl teplot
T	K	střední teplota spalin
T_0	K	teplota spalin na konci ohniště
T_a	K	teplota nechlazeného plamene
T_z	K	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$tl.$	m	tloušťka stěny trubky
v	m^3/kg	měrný objem média
V_0	m^3	objem ohniště
w	m/s	rychlost spalin, média
x_i	-	úhlový součinitel
x_h	-	poměrná výška hořáků
Δx	-	oprava
z	-	počet trubek
$zř$	-	počet řad
ξ_{MN}	%	ztráta mechanickým nedopalem
ξ_p	%	ztráta hořlavinou v popílků
ξ_s	%	ztráta hořlavinou ve škváře
ξ_f	%	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
ξ_{sk}	%	ztráta fyzickým teplem ve škváře
$\xi_{úl}$	%	ztráta fyzickým teplem v popílků
ξ_{so}	%	ztráta sdílením tepla do okolí
ξ_k	%	komínová ztráta
α, α_0, β	-	přebytek vzduchu
α_1	W/m^2K	součinitel přestupu tepla na straně spalin
α_2	W/m^2K	součinitel prostupu tepla na straně média
α_k	W/m^2K	součinitel prostupu tepla konvekcí
α_s	W/m^2K	součinitel prostupu tepla sáláním
ω	-	součinitel omývání desek
ξ	-	součinitel zanesení stěn
η	Pa/s	dynamická viskozita
η_k	%	tepelná účinnost kotle
λ	W/mK	součinitel tepelné vodivosti
ν	m^2/s	kinematická viskozita
σ_1	-	poměrná příčná rozteč
σ_2	-	poměrná podélná rozteč
σ_3	-	poměrná úhlopříčná rozteč
π	-	Ludolfovo číslo
ϕ	-	součinitel uchování tepla
ϕ	-	součinitel tepelné efektivity
t_0	$^{\circ}\text{C}$	teplota na konci ohniště
t_a	$^{\circ}\text{C}$	teplota nechlazeného plamene

Seznam použitých zkratk

SCR	selektivní katalytická redukce
OVZ	ohřívák vzduchu
hl	hlavní, horní ležatý přehřívák
dl	dolní ležatý přehřívák
vys	výsypka
ps	přední stěna
zs	zadní stěna
sp	spaliny
šot	deskový přehřívák
V	výparník
S	strop
pp	protiproudý přehřívák
sp	souproudý přehřívák
mř	mříž
eko	ekonomizér
luvo	ohřívák vzduchu
cel	celková
NO _x	oxidy dusíku

Seznam příloh

1. Výkres kotle