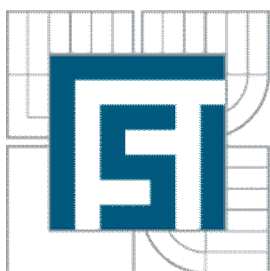




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VERTIKÁLNÍ KOTEL NA SPALOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU
VERTICAL BOILER FOR NATURAL GAS COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETR SEDLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Sedlák

který/která studuje v **magisterském 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:

Vertikální kotel na spalování zemního plynu

v anglickém jazyce:

Vertical Boiler for Natural Gas Combustion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámit se s problematikou spalování zemního plynu a navrhnout kotel dle zadání.

Parametry kotle: výkon kotle 60 t/h, tlak přehřáté páry 7 MPa, teplota přehřáté páry 490 °C, teplota napájecí vody 125°C

Palivo: zemní plyn o výhřevnosti 34,23 MJ/Nm³

plynové hořáky ze spodní části spalovací komory

Cíle diplomové práce:

Navrhnout vertikální kotel na spalování zemního plynu dle výše uvedených parametrů, včetně dimenzování jednotlivých teplosměnných ploch.

Seznam odborné literatury:

Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Budaj: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

Baláš, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 19.11.2014



J. Pospíšil

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

J. Katolický

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá tepelným výpočtem a návrhem kotle na spalování zemního plynu. Cílem práce je návrh velikosti výhřevných ploch, tak aby pára splňovala požadavky teploty 490 °C, tlaku 7 MPa a parního výkonu 60 t/h.

Klíčová slova

Kotel, pára, zemní plyn, přehřívák, výparník, ekonomizér

Abstract

This master's thesis is dealing with the thermal calculation and design of boilers for natural gas combustion. The aim is to design the heating surfaces, so as to meet the requirements of the steam temperature of 490 °C, the pressure of 7 MPa and the steam output of 60 t/h.

Key words

Boiler, steam, natural gas, steam superheater, evaporator, economizer

Bibliografická citace

SEDLÁK, P. *Vertikální kotel na spalování zemního plynu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 135 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vertikální kotel na spalování zemního plynu vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D a konzultanta Ing. Pavla Křetínského a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 28. května 2015

.....
Petr Sedlák

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D a panu Ing. Pavlu Křeminskému za vedení a poskytnutí odborných rad, které vedly k dokončení diplomové práce. Nakonec bych chtěl poděkovat svým rodičům, za to, že mě po celou dobu mého studia podporovali.

Obsah

1.	Úvod	13
2.	Stechiometrické výpočty	14
2.1	Spaliny	15
2.2.	Spaliny s přebytkem vzduchu ($\alpha=1,05$)	17
2.3.	Rosný bod spalin	18
2.4.	Entalpie vzduchu a spalin	19
2.5.	Výpočet účinnosti kotle	21
3	Výrobní teplo páry a množství přiváděného paliva	22
3.1.	Výrobní množství páry	22
3.2.	Množství přiváděného paliva	22
4	Výpočet spalovací komory (ohniště)	23
4.1	Základní rozměry spalovací komory	23
4.2	Geometrické parametry ohniště	24
4.2.1	Objem spalovací komory a objemové zatížení	24
4.2.2	Povrch stěn a průřezové zatížení ohniště	24
4.3	Tepelný výpočet ohniště	25
4.3.1	Teplota nechlazeného plamene	25
4.3.2	Součinitel M	25
4.3.3	Boltzmanovo číslo	26
4.3.4	Stupeň černosti ohniště	26
4.3.5	Teplota spalin na konci ohniště	28
5	Základní bilance výhřevných ploch	29
5.1	Přehřívák P3	30
5.2	Přehřívák P2	31
5.2.1	Vstřík napájecí vody mezi P3 a P2	31
5.3	Přehřívák P1	32
5.3.1	Vstřík napájecí vody mezi P2 a P1	32
5.4	Závěsné trubky	33
5.5	Výparník	33
5.6	Ekonomizér	34
5.6.1	Ekonomizér 1	34
5.6.2	Ekonomizér 2	35
6	Oblast Přehříváku P2	36
6.1	Přehřívák P2	36
6.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	37
6.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	38
6.1.3	Součinitel přestupu tepla na straně páry	40
6.1.4	Součinitel prostupu tepla k	41
6.1.5	Tepelný výkon přehříváku P2	41
6.2	Membránová stěna	43
6.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	43
6.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	44

6.2.3	Součinitel prostupu tepla k	45
6.2.4	Výkon předaný do membránové stěny.....	45
6.3	Závěsné trubky.....	46
6.3.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	47
6.3.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	47
6.3.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	47
6.3.4	Součinitel prostupu tepla k	48
6.3.5	Tepelný výkon závěsných trubek.....	49
6.4	Tepelná bilance a kontrola v oblasti P2.....	49
7	Oblast přehříváku P3.....	50
7.1	Přehřívák P3.....	50
7.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	51
7.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	52
7.1.3	Součinitel přestupu tepla na straně páry.....	54
7.1.4	Součinitel prostupu tepla k	55
7.1.5	Tepelný výkon přehříváku P3.....	55
7.2	Membránová stěna.....	56
7.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	56
7.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	57
7.2.3	Součinitel prostupu tepla k	58
7.2.4	Výkon předaný do membránové stěny.....	58
7.3	Závěsné trubky.....	59
7.3.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	59
7.3.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	60
7.3.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	60
7.3.4	Součinitel prostupu tepla k	61
7.3.5	Tepelný výkon závěsných trubek.....	62
7.4	Tepelná bilance a kontrola v oblasti P3.....	62
8	Oblast před mříží.....	63
8.1	Závěsné trubky.....	63
8.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	63
8.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	65
8.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	66
8.1.4	Součinitel prostupu tepla k	67
8.1.5	Tepelný výkon závěsných trubek.....	67
8.2	Membránová stěna.....	69
8.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	69
8.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	70
8.2.3	Součinitel prostupu tepla k	70
8.2.4	Výkon předaný do membránové stěny.....	71
8.3	Tepelná bilance a kontrola v oblasti před mříží.....	71
9	Oblast Mříže.....	72
9.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	73
9.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	74
9.1.3	Součinitel prostupu tepla k	76
9.1.4	Výkon předaný do membránové stěny.....	76
9.2	Tepelná bilance a kontrola v oblasti mříže.....	76

10	Oblast za mříží – membránová stěna	77
10.1.1	Součinitel přestupu tepla sáláním	78
10.1.2	Součinitel prostupu tepla k	80
10.1.3	Výkon předaný do membránové stěny	80
10.2	Tepelná bilance a kontrola v oblasti za mříží	81
11	Oblast Přehříváku P1	82
11.1	Přehřívák P1	82
11.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	83
11.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	84
11.1.3	Součinitel přestupu tepla na straně páry	86
11.1.4	Součinitel prostupu tepla k	87
11.1.5	Tepelný výkon přehříváku P1	87
11.2	Membránová stěna	89
11.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	89
11.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	90
11.2.3	Součinitel prostupu tepla k	90
11.2.4	Výkon předaný do membránové stěny	91
11.3	Tepelná bilance a kontrola v oblasti P1	91
12	Membránová stěna pod přehřívákem P1	92
12.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	92
12.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	93
12.1.3	Součinitel prostupu tepla k	95
12.1.4	Výkon předaný do membránové stěny	95
12.2	Tepelná bilance a kontrola v oblasti pod P1	96
13	Oblast ekonomizéru 2	97
13.1	Ekonomizér 2	97
13.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	98
13.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	100
13.1.3	Součinitel prostupu tepla k	101
13.1.4	Tepelný výkon Ekonomizéru 2	102
13.2	Membránová stěna	103
13.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	103
13.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	104
13.2.3	Součinitel prostupu tepla k	104
13.2.4	Výkon předaný do membránové stěny	105
13.3	Tepelná bilance a kontrola v oblasti Ekonomizéru	105
14	Oblast pod ekonomizérem (výstup z kotle)	106
14.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	106
14.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	107
14.1.3	Součinitel prostupu tepla k	109
14.1.4	Výkon předaný do membránové stěny	109
14.2	Tepelná bilance a kontrola v oblasti pod ekonomizérem	110
14.3	Tepelná bilance a kontrola výparníku	110

15	Ekonomizér 1	111
15.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	112
15.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním	114
15.1.3	Součinitel prostupu tepla k	115
15.1.4	Tepelný výkon Ekonomizéru 2.....	115
15.1.5	Tepelná bilance a kontrola ekonomizéru	116
16	Ohřívák vzduchu 2	117
16.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu	118
16.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	119
16.3	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	120
16.3.1	Součinitel prostupu tepla k	120
16.3.2	Tepelný výkon ohříváku vzduchu 2.....	121
17	Ohřívák vzduchu 1	122
17.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí.....	123
17.2	Výpočet součinitele přestupu tepla k	124
17.2.1	Tepelný výkon ohříváku vzduchu 1	125
18	Kontrola tepelné bilance	126
19	Závěr	127
20	Seznam použité literatury	130
21	Seznam obrázků a tabulek	131
22	Seznam použitých zkratk a symbolů	132
23	Seznam příloh.....	135

1. Úvod

Cílem diplomové práce je provést tepelný výpočet a návrh kotle spalující zemní plyn. Kotel vyrábí páru o parametrech 490 °C a tlaku 7 MPa, parní výkon činí 60 t/h. Kotel je řešen jako dvoutahový, jako zásobník pro pracovní medium slouží buben. Jako zdroj energie slouží zemní plyn, který je spalován pomocí dvou hořáků umístěnými na spodku spalovací komory. Kvůli vysokým teplotám jsou stěny kotle provedeny jako membránová stěna, aby bylo zajištěno jejich dostatečné chlazení. Ke spálení paliva dochází ve spalovací komoře, spaliny pak dále pokračují přes jednotlivé výhřevné plochy. Jako první výhřevná plocha v prvním tahu kotle je přehřívák P2, následuje přehřívák P3. Oba tyto svazky jsou zavěšeny na chlazených závěsech tzv. závěsných trubkách, které jsou součástí vyparníku P1. Spaliny jsou pak dále vedeny přes mříž do druhého tahu kotle na přehřívák P1 a druhou část ekonomizéru. Jelikož teplota spalin je za druhou částí ekonomizéru nižší než 520 °C jsou zbylé výhřevné plochy umístěny v plechovém kanále. Aby se zvýšila účinnost je spalovací vzduch nejprve ohříván vodou z ekonomizéru na 50 °C a následně spalinami na 100 °C. Další zvyšování teploty spalovacího vzduchu není vhodné z hlediska tvorby No_x resp. emisí.

Při výpočtech jsem postupoval dle rad konzultanta a doporučené literatury [1] [2], samotný výpočet byl proveden pomocí počítačového softwaru [3], hodnoty entalpií vodní páry určeny z mobilní aplikace [5]

2. Stechiometrické výpočty

Složení a výhřevnost zemního plynu

Výhřevnost	Q_i^r	35,870	MJ/Nm ³
Metan	CH ₄	98,39	%
Ethan	C ₂ H ₆	0,44	%
Propan	C ₃ H ₈	0,16	%
Butan	C ₄ H ₁₀	0,07	%
Pentan	C ₅ H ₁₂	0,03	%
Dusík	N ₂	0,84	%
Oxid uhličitý	CO ₂	0,07	%
Celkem	-	100	%

Tabulka 1 Parametry zemního plynu [5]

Minimální objem kyslíku pro spálení 1 m³ zemního plynu

$$Oo_{2\min} = 0,5 * \frac{CO}{100} + 0,5 * \frac{H_2}{100} + 1,5 * \frac{H_2S}{100} + \sum (x + \frac{y}{4}) * \frac{C_xH_y}{100} - \frac{O_2}{100} \quad (2.1)$$

$$Oo_{2\min} = 0,5 * \frac{0}{100} + 0,5 * \frac{0}{100} + \frac{1,5}{100} + \sum [(1 + \frac{4}{4}) * \frac{98,39}{100} + (2 + \frac{6}{4}) * \frac{0,44}{100} + (3 + \frac{8}{4}) * \frac{0,16}{100} + (4 + \frac{10}{4}) * \frac{0,07}{100} + (5 + \frac{12}{4}) * \frac{0,03}{100}] - \frac{0}{100}$$

$$Oo_{2\min} = 1,9982[m^3 / m^3]$$

Minimální objem suchého vzduchu pro spálení 1 m³ zemního plynu

$$O_{vz\min}^S = \frac{Oo_{2\min}}{0,21} \quad (2.2)$$

$$O_{vz\min}^S = \frac{1,9982}{0,21} = 9,515[m^3 / m^3]$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1 m³ zemního plynu

$$O_{VZ \min}^V = f * O_{VZ \min}^S \quad (2.3)$$

- součinitel f se vypočte ze vztahu

$$f = 1 + \varphi * \frac{p''}{p_c - \varphi * p''} \quad (2.4)$$

$$f = 1 + 0,7 * \frac{2337}{98100 - 0,7 * 2337} = 1,017$$

Volíme pro teplotu 20 °C a vlhkost vzduchu $\varphi=70\%$

$$p'' = 2337 [Pa]$$

$$p_c = 98100 [Pa]$$

$$O_{VZ \min}^V = 1,017 * 9,515 = 9,676 [m^3/m^3]$$

Objem vodní páry ve vzduchu

$$O_{H_2O} = O_{VZ \min}^V - O_{VZ \min}^S \quad (2.5)$$

$$O_{H_2O} = 9,676 - 9,515 = 0,1613 [m^3/m^3]$$

2.1 Spaliny

Objem CO₂ ve spalínách

$$O_{CO_2}^S = 0,01(CO + CO_2 + \sum x * C_xH_y + 0,03 * O_{VZ \min}^S) \quad (2.6)$$

$$O_{CO_2}^S = 0,1 * [0,7 + (98,39 + 2 * 0,44 + 3 * 0,16 + 4 * 0,07 + 5 * 0,03) + 0,03 * 9,515]$$

$$O_{CO_2}^S = 1,00535 [m^3/m^3]$$

Objem dusíku ve spalínách

$$O_{N_2}^S = 0,01 * (N + 78,05 * O_{VZ \min}^S) \quad (2.7)$$

$$O_{N_2}^S = 0,01 * (0,84 + 78,05 * 9,515) = 7,43 [m^3/m^3]$$

Objem argonu ve spalínách

$$O_{Ar}^S = 0,0092 * O_{VZ \min}^S \quad (2.8)$$

$$O_{Ar}^S = 0,0092 * 9,515 = 0,0875 [m^3/m^3]$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2O}^S = 0,01 * \left[\frac{V}{2} * C_x H_y + H \right] + (f - 1) * O_{VZ \min}^S \quad (2.9)$$

$$O_{H_2O}^S = 0,01 * \left(\frac{4}{2} * 98,39 + \frac{6}{2} * 0,44 + \frac{8}{2} * 0,16 + \frac{10}{2} * 0,07 + \frac{12}{2} * 0,03 \right) + (1,017 - 1) * 9,515$$

$$O_{H_2O}^S = 2,154 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Objem suchých spalin

$$O_{sp \min}^S = O_{N_2}^S + O_{Ar}^S + O_{CO_2}^S \quad (2.10)$$

$$O_{sp \min}^S = 7,43 + 0,0875 + 1,005 = 8,52 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Objem vlhkých spalin

$$O_{sp \min} = O_{sp \min}^S + O_{H_2O}^S \quad (2.11)$$

$$O_{sp \min} = 8,52 + 2,154 = 10,681 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Výpočet hustoty spalin

$$\rho_{sp} = \frac{\sum O_i * \rho_i}{O_{sp \min}} \quad (2.12)$$

$$\rho_{sp} = \frac{O_{CO_2}^S * \rho_{CO_2} + O_{N_2}^S * \rho_{N_2} + O_{Ar}^S * \rho_{Ar} + O_{H_2O}^S * \rho_{H_2O}}{O_{sp \min}}$$

$$\rho_{sp} = \frac{1,0035 * 1,98 + 7,43 * 1,25 + 0,0875 * 1,78 + 2,15 * 0,806}{10,681} = 1,23 \text{ [kg/Nm}^3\text{]}$$

2.2. Spaliny s přebytkem vzduchu ($\alpha=1,05$)

Objem kyslíku ve spalinách

$$O_{O_2} = (\alpha - 1) * 0,21 * O_{VZ \min}^S \quad (2.13)$$
$$O_{O_2} = (1,05 - 1) * 0,21 * 9,515 = 0,1 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^S + (\alpha - 1) * [(f - 1) * O_{VZ \min}^S] \quad (2.14)$$
$$O_{H_2O} = 2,15 + (1,05 - 1) * [(1,017 - 1) * 9,515] = 2,162 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem dusíku ve spalinách

$$O_{N_2} = O_{N_2}^S + (\alpha - 1) * 0,7805 * O_{VZ \min}^S \quad (2.15)$$
$$O_{N_2} = 7,43 + (1,05 - 1) * 0,7805 * 9,151 = 7,81 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem argonu ve spalinách

$$O_{Ar} = O_{Ar}^S + (\alpha - 1) * 0,0092 * O_{VZ \min}^S \quad (2.16)$$
$$O_{Ar} = 0,0875 + (1,05 - 1) * 0,0092 * 9,515 = 0,092 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem CO₂ ve spalinách

$$O_{CO_2} = O_{CO_2}^S + (\alpha - 1) * 0,0003 * O_{VZ \min}^S \quad (2.17)$$
$$O_{CO_2} = 1,0053 + (1,05 - 1) * 0,0003 * 9,515 = 1,0055 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem suchých spalin s přebytkem vzduchu

$$O_{sp}^S = O_{O_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{CO_2} \quad (2.18)$$
$$O_{sp}^S = 0,1 + 7,81 + 0,092 + 1,0055 = 9,0035 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Objem vlhkých spalin s přebytkem vzduchu

$$O_{sp} = O_{sp}^S + O_{H_2O} \quad (2.19)$$
$$O_{sp} = 9,0035 + 2,162 = 11,165 \text{ [m}^3/\text{m}^3]$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu

$$O_{VZ} = O_{VZ \min}^V * \alpha \tag{2.20}$$

$$O_{VZ} = 9,676 * 1,05 = 10,16 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Hustota spalin s přebytkem vzduchu

$$\rho_{sp} = \frac{\sum O_i * \rho_i}{O_{sp}} \tag{2.21}$$

$$\rho_{sp} = \frac{O_{O_2} * \rho_{O_2} + O_{N_2} * \rho_{N_2} + O_{CO_2} * \rho_{CO_2} + O_{Ar} * \rho_{Ar} + O_{H_2O} * \rho_{H_2O}}{O_{sp}}$$

$$\rho_{sp} = \frac{0,1 * 1,428 + 7,81 * 1,25 + 1,0055 * 1,98 + 0,092 * 1,78 + 2,162 * 0,805}{11,165} = 1,236 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

2.3. Rosný bod spalin

Jelikož palivo neobsahuje žádnou síru, rosný bod spalin bude mít teplotu sytosti vodní páry ve spalinách.

Střední zdánlivá molová hmotnost

$$M = \sum M_i * X_i = M_{N_2} * X_{N_2} + M_{O_2} * X_{O_2} + M_{CO_2} * X_{CO_2} + M_{Ar} * X_{Ar} \tag{2.22}$$

$$M = 28 * 0,867 + 32 * 0,0110 + 44 * 0,1116 + 39,9 * 0,010 = 29,95$$

Měrná plynová konstanta

$$r = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{29,95} = 277,56 \text{ [kJ/kg*K]} \tag{2.23}$$

Měrná vlhkost

$$x = \frac{M_i * X_i}{M} = \frac{M_{H_2O} * X_{H_2O}}{M} = \frac{18 * 0,1936}{29,95} = 0,116 \tag{2.24}$$

Výpočet parciálního tlaku vodní páry

$$p_p = \frac{x^* p}{\frac{r}{r_v} + 0,116} \tag{2.25}$$

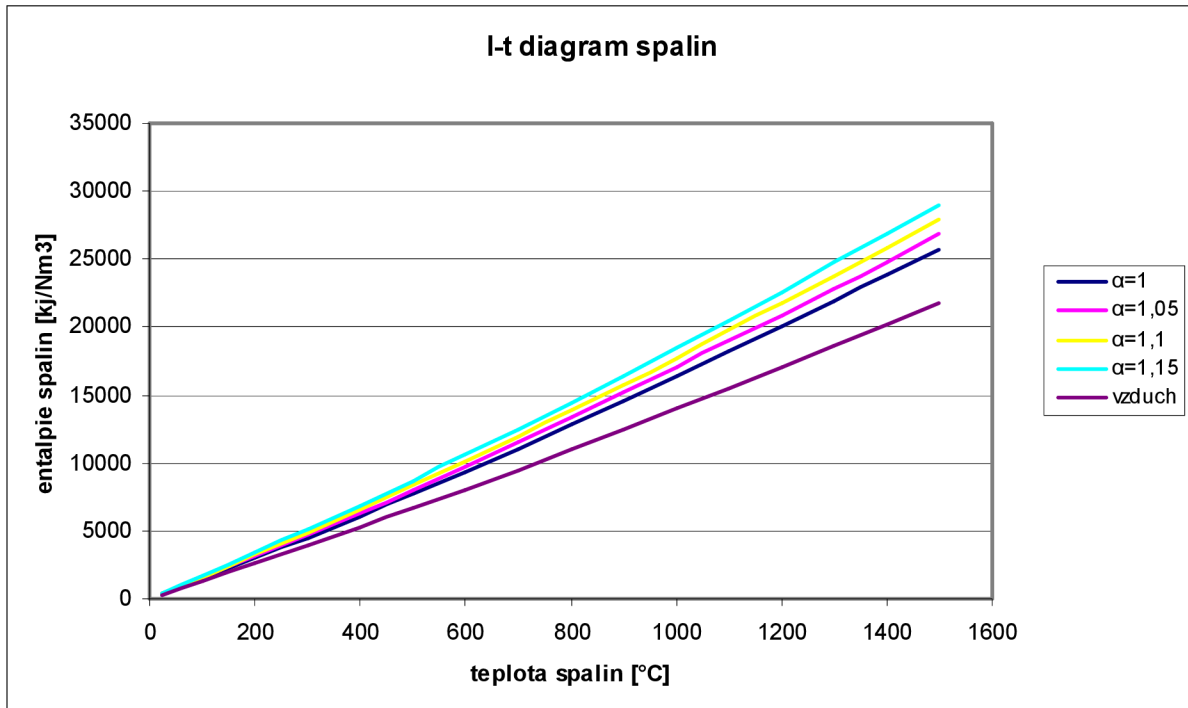
$$p_p = \frac{0,116 * 98100}{\frac{277,56}{462} + 0,116} = 15917 [Pa]$$

Tomuto tlaku odpovídá teplota 54,4 °C

2.4. Entalpie vzduchu a spalin

teplota [°C]	I _{spmin} [kJ/Nm ³]	I _{vz} [kJ/Nm ³]	α			
			1	1,05	1,1	1,15
25	369,9639582	316,2127833	369,964	385,7746	401,5852	417,3959
100	1464,042672	1283,135537	1464,043	1528,199	1592,356	1656,513
200	2963,927482	2582,027566	2963,927	3093,029	3222,13	3351,232
300	4498,304961	3904,465586	4498,305	4693,528	4888,752	5083,975
400	6072,737529	5255,271641	6072,738	6335,501	6598,265	6861,028
500	7688,550637	6637,413184	7688,551	8020,421	8352,292	8684,163
600	9347,054824	8049,970987	9347,055	9749,553	10152,05	10554,55
700	11044,80262	9492,025823	11044,8	11519,4	11994,01	12468,61
800	12781,15021	10957,85256	12781,15	13329,04	13876,94	14424,83
900	14549,36344	12453,9826	14549,36	15172,06	15794,76	16417,46
1000	16356,81828	13970,1108	16356,82	17055,32	17753,83	18452,33
1100	18186,43842	15506,07582	18186,44	18961,74	19737,05	20512,35
1200	20044,90723	17052,36264	20044,91	20897,53	21750,14	22602,76
1300	21923,50438	18608,97127	21923,5	22853,95	23784,4	24714,85
1400	23819,01463	20175,57899	23819,01	24827,79	25836,57	26845,35
1500	25733,7354	21762,02351	25733,74	26821,84	27909,94	28998,04
1600	27679,76474	23348,95212	27679,76	28847,21	30014,66	31182,11
1800	31579,61524	26552,96795	31579,62	32907,26	34234,91	35562,56
2000	35531,539	29796,81875	35531,54	37021,38	38511,22	40001,06
2500	41275,80716	37699,51911	41275,81	43160,78	45045,76	46930,74

Tabulka 2 Entalpie spalin při spálení 1Nm³ plynu



Obrázek 1 I-t diagram spalín

2.5. Výpočet účinnosti kotle

Účinnost kotle vypočteme pomocí nepřímé metody, jednotlivé ztráty se při návrhu kotle odhadnou dle konstrukce kotle a praktických zkušeností.

Redukovaná výhřevnost

Jelikož palivo nijak neohříváme cizím zdrojem, nepřivádíme teplo parou při ofukování stěn a nezavádíme recirkulaci spalin. Je redukovaná výhřevnost rovna výhřevnosti paliva.

$$Q_{ired} = Q_i^r = 35870 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]} \quad (2.26)$$

Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 * mgCO * O_{sp\ min}^S}{(21 - O_{2ref}) * Q_{ired}} \quad (2.27)$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 * 100 * 8,52}{(21 - 3) * 35870} = 0,000279$$

$mgCO$ – je emisní limit CO ve spalinách pro spalování plynného paliva. Hodnota je určena z tabulky.

Ztráta sáláním a zdílením tepla do okolí

Tato ztráta představuje teplo, které je odvedeno pláštěm z kotle do okolí. Její velikost závisí na velikosti a výkonu kotle, na kvalitě izolace stěn a způsobu oplechování. Pro předběžný výpočet se povrch kotle nahradí jeho parním výkonem a ztráta se určí z diagramu podle druhu nátěru oplechování.

$$Z_{sv} = 0,0083$$

Z_{sv} - určeno pro hliníkový nátěr oplechování

Ztráta citelným teplem spalin (Komínová ztráta)

Komínová ztráta představuje teplo, které je odvedeno spalinami do komína a nelze jej v kotli už dále využít. Tato ztráta nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle a závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem. Teplota na konci kotle byla odhadnuta na 110 °C a teplota studeného vzduchu na 25 °C

$$I_{sp(110^{\circ}C)} = 1684,68 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$I_{vz(25^{\circ}C)} = 316,21 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

- entalpie jsou určeny lineární interpolací z Tabulky 2 entalpie spalin

$$Z_K = \frac{I_{sp} - 1,05 * I_{vz}}{Q_{ired}} \quad (2.28)$$

$$Z_K = \frac{1684,68 - 1,05 * 316,21}{35870} = 0,0377$$

Účinnost kotle

Nyní již známe jednotlivé ztráty a je možné dopočítat účinnost kotle nepřímým způsobem.

$$\eta_K = 1 - (Z_{CO} - Z_{SV} - Z_K) * 100 \quad (2.29)$$

$$\eta_K = 1 - (0,000279 - 0,0083 - 0,0377) * 100 = 95,37 [\%]$$

3 Výrobní teplo páry a množství přiváděného paliva

3.1. Výrobní množství páry

Jelikož kotel nemá žádné mezipřihříváky páry, není odebíraná sytá pára a na rady konzultanta neuvažují s odluhem v bubnu. Je pak vztah pro výpočet výrobního tepla roven:

$$Q_V = M_{pp} * (i_{pp} - i_{np}) \quad (3.1)$$

$$Q_V = 16,667 * (3386,9 - 530,2) = 47611,66 [kW]$$

kde M_{pp} je průtok přehřáté páry, i_{pp} je entalpie přehřáté páry, i_{np} je entalpie napájecí vody. Entalpie byly určeny pomocí programu [4]

3.2. Množství přiváděného paliva

$$M_{pal} = M_{pv} = \frac{Q_V}{Q_{ired} * \frac{\eta_K}{100}} \quad (3.2)$$

$$M_{pv} = \frac{47611,66}{35870 * \frac{95,37}{100}} = 1,3917 [m^3/s]$$

4 Výpočet spalovací komory (ohniště)

Spalovací komora je prostor v kotli do něhož se pomocí hořáku přivádí palivo (zemní plyn) se vzduchem a dochází zde k hoření. Spalovací komora je nejvíce tepelně namáhána část kotle a je obvykle zcela vyplněná plamenem, proto se nechává zcela volná a je konstruována jako membránová stěna, aby bylo zajištěno chlazení stěn kotle.

Cílem této kapitoly je výpočet základních rozměrů spalovací komory, určit objemové a průřezové zatížení ohniště. Vypočítat teplotu resp. entalpii nechlazeného plamene a teplotu resp. entalpii na konci spalovací komory, která by neměla kvůli emisím NO_x překročit teplotu 1300 °C.

4.1 Základní rozměry spalovací komory

Rozměry spalovací komory byly vypočítány pomocí vzorců, které byly poskytnuty konzultantem. Pomocí těchto vztahů si vypočítám průměr a výšku plamene, aby nedocházelo k opalování stěn ohniště je k těmto rozměrům na radu konzultanta připočtena vzdálenost alespoň 0,5 m. Vztahy vychází z výkonu kotle, který je rozdělen mezi 2 hořáky umístěnými ve spodku spalovací komory.

Pro výšku plamene platí:

$$l = \sqrt[3]{\frac{MW}{2}} * 2,22 \quad (4.1)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{M_{pp} * (i_{pp} - i_{nv})}{1000 * 2}} * 2,22$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{16,667 * (3386,9 - 530,2)}{1000 * 2}} * 2,22 = 6,4 [m]$$

Aby nedošlo k opálení vrchní klenby a nedošlo k překročení teploty na konci ohniště je celková výška spalovací komory:

$$l = 6,4 + 0,5 = 6,9 [m]$$

Šířka a hloubka spalovací komory se vypočítá ze vztahu pro průměr plamene, tady se na každou stranu od plamene připočte vzdálenost 0,5 m i mezi hořákama, aby nedošlo k opálení stěn ohniště.

$$\phi = \sqrt{\frac{MW}{2}} * 0,4 \quad (4.2)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{M_{pp} * (i_{pp} - i_{nv})}{1000 * 2}} * 0,4$$

$$\phi = \sqrt{\frac{16,667 * (3386,9 - 530,2)}{1000 * 2}} * 0,4 = 1,95$$

Výsledné rozměry spalovací komory pak jsou:

Šířka $A=5,402$ [m]

Hloubka $B=2,951$ [m]

Výška $l=6,9$ [m]

4.2 Geometrické parametry ohniště

4.2.1 Objem spalovací komory a objemové zatížení

Do objemu spalovací komory musím připočítat objem zešikmených částí, výsledný objem ohniště je pak:

$$V_o = 102,58 [m^3]$$

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_{pv} * Q_i^r}{V_o} \quad (4.3)$$

$$q_v = \frac{1,39 * 35870}{102,58} = 486,67 [kW/m^3]$$

4.2.2 Povrch stěn a průřezové zatížení ohniště

Průřezové zatížení ohniště

$$q_s = \frac{M_{pv} * Q_i^r}{S_o} \quad (4.4)$$

$$q_s = \frac{1,39 * 35870}{5,402 * 2,951} = 3,13 [MW/m^2]$$

Celkový povrch ohniště

$$F = 137,68 \text{ m}^2$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{ú} = F * x \tag{4.5}$$
$$F = 137,68 * 1 = 137,68 \text{ [m}^2\text{]}$$

Kde x je uhlový součinitel trubkové stěny, pro membránovou stěnu je $x=1$

4.3 Tepelný výpočet ohniště

Cílem tohoto výpočtu je určení teploty na konci ohniště. Přenos tepla se zde děje převážně sáláním, konvekce se zde zanedbává. Vzorce pro výpočet teploty na konci spalovací komory zahrnují závislost mezi teplotou nechlazeného plamene, Boltzmanovým číslem, stupněm černosti ohniště a součinitelem M .

4.3.1 Teplota nechlazeného plamene

Je to teoretická spalovací teplota, která by nastala ve spalovací komoře v plameni, pokud by nebylo odváděno teplo. Jelikož uvažujeme pouze ztrátu chemickým nedopalem, nepřivádíme teplo do kotle cizím zdrojem a nezavádíme recirkulaci. Je pak vztah zjednodušen:

$$I_u = Q_{ired} * (1 - Z_{CO}) + Q_{VZ} \tag{4.6}$$
$$I_u = 35870 * (1 - 0,000279) + 1347,29 = 37207,27 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Kde Q_{VZ} je entalpie přiváděného vzduchu do spalovací komory

Této entalpii odpovídá teplota:

$$t_{np} = 2015 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.3.2 Součinitel M

Součinitel M představuje průběh teplot v ohništi, jeho velikost je závislá na poloze maximální teploty plamene a druhu paliva. Pro plynná paliva je součinitel M vyjádřen:

$$M = 0,54 - 0,2 * x_{pl} \tag{4.7}$$
$$M = 0,54 - 0,2 * 0,25 = 0,49$$

kde x_{pl} je poloha maximální teploty plamene, pro plyn je hodnota volena $x_{pl} = 0,25$

4.3.3 Boltzmanovo číslo

$$Bo = \frac{\varphi * M_{pv} * \overline{O_{sp}} * C}{5,7 * 10^{-11} * \overline{\psi} * F * T_{np}^3} \quad (4.8)$$

$$Bo = \frac{0,9917 * 1,39 * 20,065}{5,7 * 10^{-11} * 0,65 * 137,68 * (2015 + 273,15)^3} = 0,453$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - Z_{SV} \quad (4.9)$$

$$\varphi = 1 - 0,083$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp}} * C = \frac{I_u - I_o}{t_{np} - t_o} \quad (4.10)$$

$$\overline{O_{sp}} * C = \frac{37207,27 - 22639,88}{2015 - 1289} = 20,065 \text{ [kJ/m}^3\text{K]}$$

kde t_o a I_o jsou odhady teploty a entalpie spalin na konci spalovací komory.

4.3.4 Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{a_{pl}}{a_{ap} + (1 - a_{ap}) * \overline{\psi}} \quad (4.11)$$

$$a_o = \frac{0,315}{0,315 + (1 - 0,315) * 0,65} = 0,415$$

Stupeň černosti plamene

Pro spalování plynu je vztah pro stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = m * a_{sv} + (1 - m) * a_{ns} \quad (4.12)$$

$$a_{pl} = 0,122 * 0,365 + (1 - 0,122) * 0,308 = 0,315$$

Kde m je součinitel zaplnění ohniště svítivým plamenem, volí se dle druhu paliva a v závislosti na objemovém tepelném zatížením ohniště, $m=0,122$.

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými tříatomovými plyny

$$k_{ns} = k_{sp} * r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_{sp} * s}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{T_o}{1000} \right) * r_{sp} \quad (4.13)$$

$$k_{ns} = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,1936}{3,16 * \sqrt{0,028 * 2,68}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{1562,15}{1000} \right) * 0,283 = 1,377 [1/m * MPa]$$

Objemová část tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,09 + 0,1936 = 0,283$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p * r_{sp} = 0,1 * 0,283 = 0,0283$$

p volím 0,1 MPa

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 * \frac{V_o}{F} = 3,6 * \frac{102,58}{137,68} = 2,68 [m] \quad (4.14)$$

Stupeň černosti nesvítvivé části plamene

$$a_{ns} = 1 - e^{-(k_{ns} * p * s)} = 1 - e^{-(1,377 * 0,1 * 2,68)} = 0,308 \quad (4.15)$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_{sv} = 0,3 * (2 - \alpha) * \left(1,6 * \frac{T_o}{1000} - 0,5 \right) * \frac{C^r}{H^r} \quad (4.16)$$

$$k_{sv} = 0,3 * (2 - 1,05) * \left(1,6 * \frac{1562,15}{1000} - 0,5 \right) * 2,98 = 1,698 [1/m * MPa]$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku paliva

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 * \sum \frac{m}{n} * C_m * H_n \quad (4.17)$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 * \left(\frac{1}{4} * 98,4 + \frac{2}{6} * 0,44 + \frac{3}{8} * 0,16 + \frac{4}{10} * 0,07 + \frac{5}{12} * 0,03 \right) = 2,98$$

4.3.5 Teplota spalin na konci ohniště

Nyní provedu kontrolní výpočet teploty na konci ohniště, na začátku tato teplota byla pouze odhadnuta aby bylo možné vypočítat některé veličiny. Pokud se skutečná teplota na konci ohniště bude lišit s odhadnutou hodnotou více jak o 50 °C je nutné výpočet opakovat.

$$t_o = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M * \left(\frac{\alpha_o}{Bo}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (4.18)$$

$$t_o = \frac{2015 + 273,15}{1 + 0,49 * \left(\frac{0,415}{0,453}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1288,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rozdíl teplot na konci ohniště vyhovuje toleranci:

$$\Delta t_o = t_{od} - t_o = 1289 - 1288,7 = 0,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplota předaná v ohništi do výparníku

$$Q_{\text{vypSk}} = M_{pv} * \varphi * (I_u - I_o) \quad (4.19)$$

$$Q_{\text{vypSk}} = 1,39 * 0,9917 * (37207,26 - 22639,8) = 20106 \text{ [kW]}$$

5 Základní bilance výhřevných ploch

Bilance byla sestavena dle výpočtů uvedených v kapitole 5. Jednotlivé entalpické spády byly určeny podle použité literatury. Podle výkonů jednotlivých výhřevných ploch se v následujících kapitolách budou dimenzovat jednotlivé výhřevné plochy. Výsledný výkon navrhovaných ploch se však bude mírně lišit od předpokládaného.

Přehřívák 3					
T_{p3out}	490	°C	T_{p3in}	392,9	°C
P_{p3out}	7	MPa	P_{p3in}	7,15	MPa
\dot{i}_{p3out}	3386,9	kJ/kg	\dot{i}_{p3in}	3136,9	kJ/kg
Přehřívák 2					
T_{p2out}	432,2	°C	T_{p2in}	332,9	°C
P_{p2out}	7,15	MPa	P_{p2in}	7,3	MPa
\dot{i}_{p2out}	3217,51	kJ/kg	\dot{i}_{p2in}	2952,51	kJ/kg
Přehřívák 1					
T_{p1out}	356	°C	T_{p1in}	301,31	°C
P_{p1out}	7,3	MPa	P_{p1in}	7,45	MPa
\dot{i}_{p1out}	3027,42	kJ/kg	\dot{i}_{p1in}	2834,44	kJ/kg
Závěsné trubky					
T_{Zout}	301,31	°C	T_{Zin}	290,08	°C
P_{Zout}	7,45	MPa	P_{Zin}	7,45	MPa
I_{Zout}	2834,44	kJ/kg	I_{Zin}	2766,5	kJ/kg
Výparník					
T_{Vypout}	290,08	°C	T_{Vypin}	263,15	°C
P_{Vypout}	7,45	MPa	P_{Vypin}	7,45	MPa
I_{Vypout}	2766,5	kJ/kg	I_{Vypin}	1148,98	kJ/kg
Ekonomizér					
T_{Ekoout}	270,08	°C	$T_{Eko in}$	125	°C
P_{Ekoout}	7,45	MPa	$P_{Eko in}$	7,65	MPa
I_{Ekoout}	1184,9	kJ/kg	$I_{Eko in}$	530,2	kJ/kg

Tabulka 3 Základní bilance výhřevných ploch

5.1 Přehřívák P3

Na straně média je přehřívák P3 poslední výhřevnou plochou a pára z něj odchází na turbínu. V kotli je přehřívák P3 řazen jako druhá teplosměnná plocha v prvním tahu kotle. Přehřívák je konstruován jako souprůdný výměník. Pro zlepšení parametrů páry je mezi přehřívák P3 a přehřívák P2 vřazen vstřík, kde se přehřátá pára směšuje s 3% napájecí vody.

Entalpický spád na přehříváku P3

$$\Delta i_{p3} = 250 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlaková ztráta

$$\Delta p_{p3} = 0,15 \text{ [MPa]}$$

Vstupní entalpie přehřáté páry

$$i_{p3in} = i_{p3out} - \Delta i_{p3} = 3386,9 - 250 = 3136,9 \text{ [kJ/kg]}$$

Průtok páry přehřívákem

$$M_{pp} = 16,667 \text{ [kg/s]}$$

Tepelný výkon předaný v přehříváku

$$Q_{p3} = M_{pp} * (i_{p3out} - i_{p3in}) = 16,667 * (3386,9 - 3136,9) = 4166,6 \text{ [kW]} \quad (5.1)$$

5.2 Přeřívák P2

Přeřívák P2 je za strany média předposlední výhřevnou plochou a pára je odtud vedena do směšovacího výměníku kde se mísí s 3% napájecí vody. Přeřívák P2 je konstruován jako souproudý výměník. V kotli je přeřívák P2 řazen jako první teplosměnná plocha umístěná za spalovací komorou.

5.2.1 Vstřik napájecí vody mezi P3 a P2

Výpočet výstupní entalpie

$$i_{P2out} = \frac{M_{pp} * i_{P3in} - 0,03 * M_{pp} * i_{nv}}{M_{pp} * 0,97} \quad (5.2)$$

$$i_{P2out} = \frac{3386,9 - 0,03 * 530,2}{0,97} = 3217,51 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpický spád přeříváku

$$\Delta i_{P2} = 265 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlaková ztráta

$$\Delta p_2 = 0,15 \text{ [MPa]}$$

Vstupní entalpie přeřáté páry

$$i_{P2in} = i_{P2out} - \Delta i_{P2} = 3217,51 - 265 = 2952,51 \text{ [kJ/kg]}$$

Tepelný výkon předaný v přeříváku

$$Q_{P2} = 0,97 * M_{pp} * (i_{P2out} - i_{P2in}) = 0,97 * 16,667 * (3217,51 - 2952,51) = 4284,16 \text{ [kW]} \quad (5.3)$$

5.3 Přeřívák P1

Přeřívák P1 je první teplosměnná plocha umístěná v druhém tahu kotle, pára do přeříváku je vedena z bubnu přes závěsné trubky umístěnými v prvním tahu kotle. Přeřívák je konstruován jako protiproudý výměník. Mezi přeřívákem P2 a P1 je umístěn směšovací výměník kde se pára mísí s 3% napájecí vody.

5.3.1 Vstřik napájecí vody mezi P2 a P1

Výpočet výstupní entalpie

$$i_{p1out} = \frac{M_{pp} * i_{p2in} - 0,03 * M_{pp} * i_{nv}}{M_{pp} * 0,97} \quad (5.4)$$

$$i_{p1out} = \frac{2952,51 - 0,03 * 530,2}{0,97} = 3027,42 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpický spád přeříváku

$$\Delta i_{p1} = i_{p1out} - i_{p1in} = 3027,42 - 2834,44 = 192,98 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlaková ztráta

$$\Delta_{p1} = 0,15 \text{ [MPa]}$$

Tepelný výkon předaný v přeříváku

$$Q_{p2} = 0,94 * M_{pp} * (i_{p1out} - i_{p1in}) = 0,97 * 16,667 * (3027,42 - 2834,44) = 3216,39 \text{ [kW]} \quad (5.3)$$

5.4 Závěsné trubky

Závěsné trubky jsou umístěné napříč prvním tahem kotle, slouží jako opora k zavěšení přehříváku P2 a P3. Trubky jsou chlazené parou z bubnu, která je odtud vedena do přehříváku P1.

Entalpický spád závěsných trubek

$$\Delta i_{ztr} = i_{Zout} - i_{Zin} = 2834,448 - 2766,5 = 67,94 \text{ [kJ/kg]}$$

Výkon předaný v závěsných trubkách

$$Q_{ztr} = 0,94 * M_{pp} * (\Delta i_{ztr}) = 0,94 * 16,667 * 67,5 = 1064,53 \text{ [kW]} \quad (5.4)$$

5.5 Výparník

Ve výparníku dochází k přeměně vody na páru za konstantní teploty a tlaku. Výparník je konstruován jako membránová stěna kotle a patří sem také spalínová mříž. Voda z eka vystupuje o nedohřevu 20°C pod mezi sytosti a předeřívá spalovací vzduch z 20 °C na 50 °C

Vstupní entalpie (pokles vlivem ohřátí vzduchu)

$$I_{VZ} = \Delta I_{VZ(30^\circ\text{C})} * \alpha * M_{pv} = 386,76 * 1,05 * 1,3917 = 565,2 \text{ [kJ]} \quad (5.5)$$

kde I_{VZ} je entalpie potřebná k ohřátí vzduchu z 20 °C na 50 °C,

$$i_{Vypin} = \frac{i_{Ekoout} * M_{pp} - I_{VZ}}{M_{pp}} = \frac{1184,9 * 16,667 - 565,2}{16,667} = 1148,98 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.6)$$

Entalpický spád výparníku

$$\Delta i_{vyp} = i_{Vypout} - i_{Vypin} = 2766,5 - 1148,98 = 1617,52 \text{ [kJ/kg]}$$

Výkon potřebný pro výparník

$$Q_{Vyp} = 0,94 * M_{pp} * (\Delta i_{vyp}) = 0,94 * 16,667 * 1617,52 = 25341 \text{ [kW]} \quad (5.7)$$

5.6 Ekonomizér

Ekonomizér slouží k ohřevu napájecí vody, aby nedošlo k odpařování vody v ekonomizéru je teplota na výstupu z ekonomizéru 20 °C pod mezí sytosti. Ekonomizér je rozdělen na dva díly. Druhý díl ekonomizéru je umístěn jako poslední výhřevná plocha v druhém tahu kotle a první díl je umístěn v plechovém kanálu. Voda z ekonomizéru je vedena do výměníku kde předeřívá spalovací vzduch z 20 °C na 50 °C.

5.6.1 Ekonomizér 1

Entalpický spád Ekonomizéru 1

$$\Delta i_{Eko1} = i_{eko1out} - i_{eko1in} = 1184,9 - 786,45 = 256,25 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlaková ztáta v ekonomizéru 1 a ekonomizéru 2

$$\Delta P_{Eko} = 0,2 \text{ [MPa]}$$

Parametry média v ekonomizéru 1

Vstup	Teplota:	125 °C
	Tlak:	7,45 MPa
	Entalpie	530,2 kJ/kg
Výstup	Teplota	223,34 °C
	Tlak:	7,65 MPa
	Entalpie:	958,95 kJ/kg

Výkon předaný ekonomizérem 1

$$Q_{eko1} = 0,94 * M_{pp} * (\Delta i_{Eko1}) = 0,94 * 16,667 * (428,75) = 6717,12 \text{ [kW]} \quad (5.8)$$

5.6.2 Ekonomizér 2

Entalpický spád Ekonomizéru 2

$$\Delta i_{Eko2} = i_{eko2out} - i_{eko2in} = 1184,9 - 958,95 = 225,95 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlaková ztráta v ekonomizéru 1 a ekonomizéru 2

$$\Delta P_{Eko} = 0,2 \text{ [MPa]}$$

Parametry média v ekonomizéru 2

Vstup	Teplota:	223,34 °C
	Tlak:	7,65 MPa
	Entalpie	958,95 kJ/kg

Výstup	Teplota	270,08 °C
	Tlak:	7,45 MPa
	Entalpie:	1184,9 kJ/kg

Výkon předaný ekonomizérem 2

$$Q_{eko1} = 0,94 * M_{pp} * (\Delta i_{Eko1}) = 0,94 * 16,667 * (225,95) = 3539,95 \text{ [kW]}$$

6 Oblast Přehříváku P2

6.1 Přehřívák P2

Základní parametry přehříváku

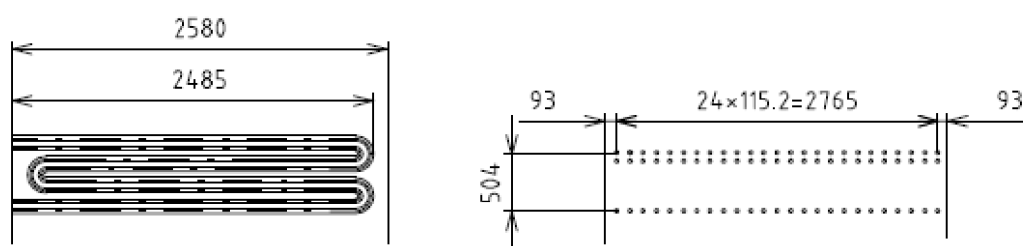
Vnější průměr trubky D	0,032	m
Vnitřní průměr trubky d	0,027	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S_1	0,115	m
Podélná rozteč S_2	0,072	m
Počet trubek n_{tr}	25	-
Počet řad z	4	-
Počet hadů x	2	-
Střední délka hadů $l_{stř}$	2,44	-

Tabulka 4 Základní parametry přehříváku P2

Základní parametry spalin a přehřáté páry

Parametry spalin			Parametry páry		
Vstupní entalpie	31509	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	332,9	$^{\circ}C$
Výstupní entalpie	25912	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	432,2	$^{\circ}C$
Teplota na vstupu	1288,7	$^{\circ}C$	Tlak na vstupu	7,3	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	1082,2	$^{\circ}C$	Tlak na výstupu	7,15	<i>MPa</i>

Tabulka 5 Parametry spalin a přehřáté páry přehříváku P2



Obrázek 2 schéma přehříváku P2

6.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{1288,7 + 1082,2}{2} = 1185,5 [^{\circ}C] \quad (6.1)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{1185,5 + 273,15}{273,15} \right) = 82,98 [m^3] \quad (6.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,1356 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$229 * 10^{-6} [m^2/s]$
Prandtlovo číslo Pr:	0,585 [-]

Fyzikální vlastnosti spalin a vodní páry pro všechny výhřevné plochy byly určeny z tabulky [1].

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D - n_z * \left(\frac{\pi * D_z^2}{4} \right) \quad (6.3)$$

$$F_{sp} = 2,58 * 2,951 - 25 * 2,43 * 0,032 - 36 * \frac{\pi * 0,038^2}{4} = 5,62 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{82,98}{5,62} = 14,76 [m/s]$$

Pozn. Průtočný průřez, rychlost spalin a fyzikální vlastnosti spalin budou shodné v celé kapitole 6. Oblast přehříváku P2

(6.3)

Příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou

$$\alpha_k = 0,2 * C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,65} * Pr^{0,33} \quad (6.4)$$

$$\alpha_k = 0,2 * 1 * 1 * \frac{0,1356}{0,032} * \left(\frac{14,76 * 0,032}{229 * 10^{-6}} \right)^{0,65} * 0,585^{0,33} = 101,13 [W/m^2K]$$

Korekční součinitele uspořádání svazku

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left(1 - (2 * \sigma_1 - 3) * \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^2} \quad (6.5)$$

$$C_s = \frac{1}{\left(1 - (2 * 3,6 - 3) * \left(1 - \frac{2,25}{2}\right)^3\right)^2} = 1$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,115}{0,032} = 3,6 \quad (6.6)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,072}{0,032} = 2,25 \quad (6.7)$$

6.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1\right) \quad (6.8)$$

$$s = 0,9 * 0,032 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,115 * 0,072}{0,032^2} - 1\right) = 0,268 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (6.9)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (6.10)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (6.11)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,268}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{1185,5 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 5,029 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (5,029) * 0,1 * 0,268 = 0,1349 \quad (6.12)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,1349} = 0,126 \quad (6.13)$$

Pozn. Optická hustota spalin a stupeň černosti proudu spalin je shodná v celé kapitole 6. Oblast přehříváku P2

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 378,06 + 25 + 273,15 = 676,2 [K] \quad (6.14)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota páry, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{\left(\frac{T_z}{T_s} \right)} \quad (6.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,126 * 1458,6^3 * \frac{1 - \left(\frac{676,2}{1458,6} \right)^{3,6}}{\left(\frac{676,2}{1458,6} \right)} = 35,10 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

6.1.3 Součinitel přestupu tepla na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{ppstř} = \frac{t_{p2out} + t_{p2in}}{2} = \frac{423,2 + 332,9}{2} = 378,06 [^{\circ}C] \quad (6.16)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř} = \frac{P_{p2out} + P_{p2in}}{2} = \frac{7,15 + 7,3}{2} = 7,225 [MPa] \quad (6.17)$$

Střední měrný objem páry

$$v_{stř} = 0,0366 [m^3/kg]$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) * n_{tr} * x = \left(\frac{\pi * 0,027^2}{4} \right) * 25 * 2 = 0,0286 [m^2] \quad (6.18)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{0,97 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,97 * 16,667 * 0,0366}{0,0268} = 20,66 [m/s] \quad (6.19)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,062 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$8,91 * 10^{-7} [m^2/s]$
Pradtlovo číslo:	1,138 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (6.20)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,062}{0,027} * \left(\frac{20,66 * 0,027}{8,91 * 10^{-7}} \right) * 1,138 * 1 * 1 * 1 = 2431,25 [W/m^2K]$$

Ekvivalentní průměr d_e je při proudění uvnitř trubky roven vnitřnímu průměru trubky

Opravné koeficienty:

$$C_t = 1$$

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

6.1.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 101,13 + 35,10 = 136,23 [W/m^2K] \quad (6.21)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 136,23}{1 + \frac{136,23}{2431,25}} = 109,65 [W/m^2K] \quad (6.22)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

6.1.5 Tepelný výkon přehříváku P2

Teplotní spád na přehříváku

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{955,84 - 659}{\ln \frac{955,84}{659}} = 798,27 [^{\circ}C] \quad (6.23)$$

$$\Delta t_v = t_{spín} - t_{p2in} = 1288,7 - 332,9 = 955,84 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{p2out} = 1082,2 - 432,2 = 659 [^{\circ}C]$$

Potřebná plocha pro přehřívák

$$S_{p2p} = \frac{Q_{p2} * 1000}{k * \Delta t} = \frac{4284,16 * 1000}{109,65 * 798,27} = 48,94 [m^2] \quad (6.24)$$

Skutečná plocha přehříváku

$$S_{p2} = \pi * D * l_{stř} * n_{tr} * x * z = \pi * 0,032 * 2,43 * 25 * 2 * 4 = 49 [m^2] \quad (6.25)$$

Skutečný výkon přehříváku

$$Q_{p2}^{skut} = S_{p2} * \Delta t * k = 49 * 798,27 * 109,65 = 4290 [kW] \quad (6.26)$$

Kontrola výkonu

$$\Delta Q = \frac{Q_{p2}^{skut} - Q_{p2}}{Q_{p2}^{skut}} * 100 = \frac{4290 - 4284,16}{4290} * 100 = 0,13 [\%]$$

Daná odchylka odpovídá možné toleranci výkonu $\pm 3\%$

6.2 Membránová stěna

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,58 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951[m]
Výška kanálu h:	1,908 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 6 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	31509	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	25912	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	1288,7	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	1082,2	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 7 Základní parametry spalin a vody

6.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 5,62}{138} = 0,163 [m] \quad (6.27)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty: $C_t = 1$
 $C_l = 1$
 $C_m = 1$

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (6.28)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,135}{0,163} * \left(\frac{14,76 * 0,163}{229 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,5852^{0,4} = 25,4 [W/m^2K]$$

6.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (6.29)$$

$$s = 0,9 * 0,032 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,115 * 0,072}{0,032^2} - 1 \right) = 0,268 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (6.30)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (6.31)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (6.32)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,268}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{1185,5 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 5,029 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (5,029) * 0,1 * 0,268 = 0,1349 \quad (6.33)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,1349} = 0,126 \quad (6.34)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_Z = t_{vstř} + \Delta t + 273,15 = 290,8 + 25 + 273,15 = 588,23 \quad (6.35)$$

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (6.36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,126 * 1458,6^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{1458,6}\right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{1458,6}\right)} = 32,39 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

6.2.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 25,4 + 32,39 = 57,79 [W/m^2 * K] \quad (6.37)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 57,79 = 49,12 [W/m^2 K] \quad (6.38)$$

6.2.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{998,68 - 792,16}{\ln \frac{998,68}{792,16}} = 891,44 [^{\circ}C] \quad (6.39)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{Vypin} = 1288,7 - 290,08 = 998,68 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{Vypout} = 1082,2 - 290,08 = 792,16 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 2 * (A + B) * h - \frac{\pi * D^2_{průřele}}{4} = 2 * (2,58 + 2,951) * 1,90 - \frac{\pi * 0,8^2}{4} = 20,6 [m] \quad (6.40)$$

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{p2}^m = S * k * \Delta t = 20,6 * 49,12 * 891,44 = 902,23 [kW] \quad (6.41)$$

6.3 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,038	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0324	m
Tloušťka stěny tl.	0,0056	m
Počet trubek n _{tr}	18	-
Počet řad z	2	-

Tabulka 8 Základní parametry závěsných trubek

Základní parametry spalin a přehřáté páry

Parametry spalin			Parametry páry		
Vstupní entalpie	31509	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	290,08	<i>°C</i>
Výstupní entalpie	25912	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	301,31	<i>°C</i>
Teplota na vstupu	1288,7	<i>°C</i>	Tlak na vstupu	7,45	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	1082,2	<i>°C</i>	Tlak na výstupu	7,45	<i>MPa</i>

Tabulka 9 Základní parametry spalin a přehřáté páry

6.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Výpočet je stejný jako u membránové stěny

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (6.42)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,135}{0,163} * \left(\frac{14,76 * 0,163}{229 * 10^{-6}} \right) * 0,5852^{0,4} = 25,4 [W/m^2K]$$

6.3.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti spalín byl již vypočítán podle vzorce (6.13) a je shodný pro celou 6. kapitolu

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_{Zstř} + \Delta t + 273,15 = 295 + 25 + 273,15 = 593,15 [^{\circ}C]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_S} \right)}{\left(\frac{T_z}{T_S} \right)} \quad (6.43)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,126 * 1458,6^3 * \frac{1 - \left(\frac{593,15}{1458,6} \right)^{3,6}}{\left(\frac{593,15}{1458,6} \right)} = 32,53 [W/m^2 * K]$$

6.3.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{Zstř} = \frac{t_{Zout} + t_{Zin}}{2} = \frac{301,31 + 290,08}{2} = 295,6 [^{\circ}C] \quad (6.44)$$

Střední tlak páry

$$P_{Zout} = P_{Zin} = P_{Zstř} = 7,45 [MPa]$$

Střední měrný objem páry

$$v_{stř} = 0,0264 [m^3/kg]$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) * n_{tr} * z = \left(\frac{\pi * 0,0324}{4} \right) * 18 * 2 = 0,0296 [m^2] \quad (6.45)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,0264}{0,0296} = 13,93 [m/s] \quad (6.46)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0592 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$5,09 * 10^{-7} [m^2/s]$
Pradtlovo číslo:	1,404 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_l * C_m \quad (6.47)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,0592}{0,0324} * \left(\frac{13,93 * 0,0324}{5,09 * 10^{-7}} \right)^{0,8} * 1,404^{0,4} = 2762 [W/m^2 * K]$$

Opravné koeficienty:	$C_l = 1$
	$C_l = 1$
	$C_m = 1$

6.3.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 25,4 + 32,53 = 57,93 [W/m^2 * K] \quad (6.48)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 57,93}{1 + \frac{57,93}{2762}} = 48,23 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.49)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

6.3.5 Tepelný výkon závěsných trubek

Tepelný spád závěsných trubek

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{987,7 - 792,16}{\ln \frac{987,7}{792,16}} = 886,37 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.50)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{zin} = 1288,7 - 301 = 987,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{zout} = 1082,2 - 290,08 = 792,16 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Plocha závěsných trubek

$$S = \pi * D * n_r * h * z = \pi * 0,038 * 18 * 1,90 * 2 = 8,20 \text{ [m]} \quad (6.51)$$

Teplo přijaté závěsnými trubkami

$$Q_{p2}^Z = S * k * \Delta t = 8,20 * 48,23 * 886,37 \text{ [kW]} \quad (6.52)$$

6.4 Tepelná bilance a kontrola v oblasti P2

Celkové teplo předané

$$Q_{p2}^{Celk} = Q_{p2}^{Skut} + Q_{p2}^m + Q_{p2}^Z = 4290 + 902,23 + 350,58 = 5542,84 \text{ [kW]} \quad (6.53)$$

Bilance spalín

$$Q_{p2}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (31509 - 25912) = 5550,9 \text{ [kW]} \quad (6.54)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{p2}^{sp} - Q_{p2}^{skut}}{Q_{p2}^{sp}} * 100 = \frac{5550,9 - 5542,84}{5550,9} * 100 = 0,14 \text{ [%]} \quad (6.55)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

7 Oblast přehříváku P3

7.1 Přehřívák P3

Základní parametry přehříváku

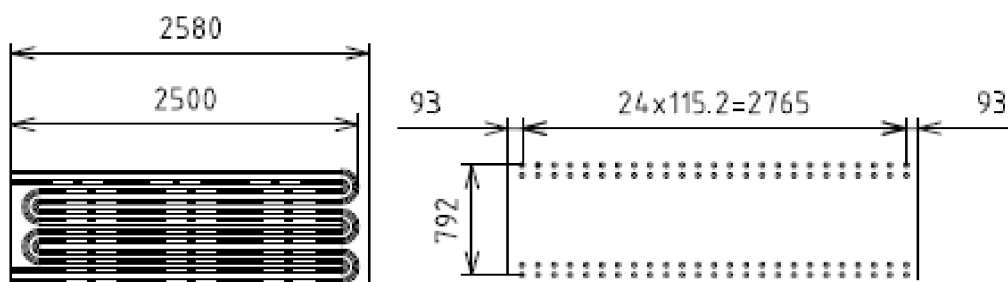
Vnější průměr trubky D	0,035	m
Vnitřní průměr trubky d	0,030	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S_1	0,115	m
Podélná rozteč S_2	0,072	m
Počet trubek n_{tr}	25	-
Počet řad z	6	-
Počet hadů x	2	-
Střední délka hadů $l_{stř}$	2,445	-

Tabulka 10 Základní parametry přehříváku P3

Základní parametry spalín a přehřáté páry

Parametry spalín			Parametry páry		
Vstupní entalpie	25912	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	392,9	$^{\circ}C$
Výstupní entalpie	21334	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	490	$^{\circ}C$
Teplota na vstupu	1082,2	$^{\circ}C$	Tlak na vstupu	7,15	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	908,32	$^{\circ}C$	Tlak na výstupu	7	<i>MPa</i>

Tabulka 11 Parametry spalín a přehřáté páry přehříváku P3



Obrázek 3 schéma přehříváku P3

7.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{1082,2 - 908,32}{2} = 995,28 [^{\circ}\text{C}] \quad (7.1)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{995,28 + 273,15}{273,15} \right) = 67,21 [m^3] \quad (7.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,1155 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$177,8 * 10^{-6} [m^2/s]$
Prandtlovo číslo Pr:	0,61 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D - n_z * \left(\frac{\pi * D_z^2}{4} \right) \quad (7.3)$$

$$F_{sp} = 2,58 * 2,951 - 25 * 2,445 * 0,035 - 36 * \frac{\pi * 0,038^2}{4} = 5,42 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{67,21}{5,43} = 12,37 [m/s] \quad (7.4)$$

Pozn. Průtočný průřez, rychlost spalin a fyzikální vlastnosti spalin budou shodné v celé kapitole 7. Oblast přehříváku P3

Příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou

$$\alpha_k = 0,2 * C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,65} * Pr^{0,33} \quad (7.5)$$

$$\alpha_k = 0,2 * 1 * 1 * \frac{0,1155}{0,035} * \left(\frac{12,37 * 0,035}{177,8 * 10^{-6}} \right)^{0,65} * 0,61^{0,33} = 89,11 [W/m^2K]$$

Korekční součinitele uspořádání svazku

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left(1 - (2 * \sigma_1 - 3) * \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^2} \quad (7.6)$$

$$C_s = \frac{1}{\left(1 - (2 * 3,29 - 3) * \left(1 - \frac{2,05}{2}\right)^3\right)^2} = 1$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,115}{0,035} = 3,29 \quad (7.7)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,072}{0,035} = 2,05 \quad (7.8)$$

7.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1\right) \quad (7.9)$$

$$s = 0,9 * 0,035 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,115 * 0,072}{0,035^2} - 1\right) = 0,24 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (7.10)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (7.11)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (7.12)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,24}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{995,28 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 6,138 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (6,138) * 0,1 * 0,24 = 0,1473 \quad (7.13)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,1473} = 0,137 \quad (7.14)$$

Pozn. Optická hustota spalin a stupeň černosti proudu spalin je shodná v celé kapitole 7. Oblast přehříváku P3

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 441,45 + 25 + 273,15 = 739,6 [K] \quad (7.15)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota páry, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{\left(\frac{T_z}{T_s} \right)} \quad (7.16)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,137 * 1286,4^3 * \frac{1 - \left(\frac{739,6}{1286,4} \right)^{3,6}}{(1286,4)} = 29,47 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalin

7.1.3 Součinitel přestupu tepla na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{ppstř} = \frac{t_{p3out} + t_{p3in}}{2} = \frac{490 + 332,9}{2} = 441,45 [^{\circ}C] \quad (7.17)$$

Střední tlak páry

$$P_{stř} = \frac{P_{p3out} + P_{p3in}}{2} = \frac{7,15 + 7}{2} = 7,075 [MPa] \quad (7.18)$$

Střední měrný objem páry

$$v_{stř} = 0,043 [m^3/kg]$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) * n_r * x = \left(\frac{\pi * 0,030^2}{4} \right) * 25 * 2 = 0,0353 [m^2] \quad (7.19)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{16,667 * 0,043}{0,0353} = 20,27 [m/s] \quad (7.20)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0675 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$1,126 * 10^{-6} [m^2/s]$
Pradtlovo číslo:	1,009 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (7.21)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,062}{0,027} * \left(\frac{20,27 * 0,03}{1,126 * 10^{-6}} \right) * 1,009 * 1 * 1 * 1 = 2003,85 [W/m^2K]$$

Ekvivalentní průměr d_e je při proudění uvnitř trubky roven vnitřnímu průměru trubky

Opravné koeficienty:	$C_t = 1$
	$C_l = 1$
	$C_m = 1$

7.1.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 89,11 + 29,4 = 118,58 [W/m^2K] \quad (7.22)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 118,58}{1 + \frac{118,58}{2003,85}} = 95,16 [W/m^2K] \quad (7.23)$$

Součinitel tepelné efektivnosti $\psi=0,85$

7.1.5 Tepelný výkon přehříváku P3

Teplotní spád na přehříváku

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{689,34 - 418,32}{\ln \frac{689,34}{418,32}} = 542,59 [^{\circ}C] \quad (7.24)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{p2in} = 1082,24 - 392,9 = 689,34 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{p2out} = 908,32 - 490 = 418,32 [^{\circ}C]$$

Potřebná plocha pro přehřívák

$$S_{p3p} = \frac{Q_{p3} * 1000}{k * \Delta t} = \frac{4166,6 * 1000}{95,16 * 542,59} = 80,69 [m^2] \quad (7.25)$$

Skutečná plocha přehříváku

$$S_{p3} = \pi * D * l_{stř} * n_{tr} * x * z = \pi * 0,035 * 2,445 * 25 * 2 * 6 = 80,65 [m^2] \quad (7.26)$$

Skutečný výkon přehříváku

$$Q_{p3}^{skut} = S_{p3} * \Delta t * k = 80,65 * 542,59 * 95,16 = 4164,6 [kW] \quad (7.27)$$

Kontrola výkonu

$$\Delta Q = \frac{Q_{p3}^{skut} - Q_{p3}}{Q_{p3}^{skut}} * 100 = \frac{4166,6 - 4164,6}{4166,6} * 100 = 0,049 [\%]$$

Daná odchylka odpovídá možné toleranci výkonu $\pm 3\%$

7.2 Membránová stěna

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,58 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951[m]
Výška kanálu h:	0,83 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 12 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	25912	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	21334	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	1082,2	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	908,32	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 13 Základní parametry spalin a vody

7.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 5,43}{138,48} = 0,157 [m] \quad (7.28)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty:

$$C_t = 1$$

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (7.29)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,1155}{0,157} * \left(\frac{12,37 * 0,157}{177,8 * 10^{-6}} \right) * 0,61^{0,4} = 23,61 [W/m^2K]$$

7.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (7.30)$$

$$s = 0,9 * 0,035 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,115 * 0,072}{0,035^2} - 1 \right) = 0,24 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (7.31)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (7.32)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (7.33)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,24}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{995,28 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 6,138 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalín

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (6,138) * 0,1 * 0,24 = 0,1473 \quad (7.34)$$

Stupeň černosti proudů spalín

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,1473} = 0,137 \quad (7.35)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_Z = t_{vstř} + \Delta t + 273,15 = 290,8 + 25 + 273,15 = 588,23 \quad (7.36)$$

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (7.37)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,137 * 1268,4^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{1268,4}\right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{1268,4}\right)} = 25 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalín

7.2.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 23,6 + 25 = 48,68 [W/m^2 * K] \quad (7.38)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 48,68 = 41,37 [W/m^2 K] \quad (7.39)$$

7.2.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{792,16 - 618,24}{\ln \frac{792,16}{618,24}} = 701,61 [^{\circ}C] \quad (7.40)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{vypin} = 1082,2 - 290,08 = 792,16 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{vypout} = 908,32 - 290,08 = 618,24 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 2 * (A + B) * h = 2 * (2,58 + 2,951) * 0,83 = 9,18 [m] \tag{7.41}$$

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{p3}^m = S * k * \Delta t = 9,18 * 41,37 * 701,61 = 266,55 [kW] \tag{7.41}$$

7.3 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,038	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0324	m
Tloušťka stěny tl.	0,0056	m
Počet trubek n _{tr}	18	-
Počet řad z	2	-

Tabulka 14 Základní parametry závěsných trubek

Základní parametry spalin a přehřáté páry

Parametry spalin			Parametry páry		
Vstupní entalpie	25912	kJ	Teplota na vstupu	290,08	°C
Výstupní entalpie	21334	kJ	Teplota na výstupu	301,31	°C
Teplota na vstupu	1082.2	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	908.32	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 15 Základní parametry spalin a přehřáté páry

7.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Výpočet je stejný jako u membránové stěny

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \tag{7.42}$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,1155}{0,157} * \left(\frac{12,37 * 0,157}{177,8 * 10^{-6}} \right) * 0,61^{0,4} = 23,61 [W/m^2K]$$

7.3.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti spalin byl již vypočítán podle vzorce (7.14) a je shodný pro celou 7. kapitolu

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_{Zstř} + \Delta t + 273,15 = 295,54 + 25 + 273,15 = 593,69 [^{\circ}\text{C}]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)}{\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (7.43)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,137 * 1268,4^3 * \frac{1 - \left(\frac{593,69}{1268,4}\right)^{3,6}}{\left(\frac{593,69}{1268,4}\right)} = 25,21 [W/m^2 * K]$$

7.3.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{Zstř} = \frac{t_{Zout} + t_{Zin}}{2} = \frac{301,31 + 290,08}{2} = 295,6 [^{\circ}\text{C}] \quad (7.44)$$

Střední tlak páry

$$P_{Zout} = P_{Zin} = P_{Zstř} = 7,45 [MPa]$$

Střední měrný objem páry

$$v_{stř} = 0,0264 [m^3/kg]$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4}\right) * n_{tr} * z = \left(\frac{\pi * 0,0324}{4}\right) * 18 * 2 = 0,0296 [m^2] \quad (7.45)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,0264}{0,0296} = 13,93 \text{ [m/s]} \quad (7.46)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0592 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$5,09 * 10^{-7}$ [m ² /s]
Pradtlovo číslo:	1,404 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (7.47)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,0592}{0,0324} * \left(\frac{13,93 * 0,0324}{5,09 * 10^{-7}} \right)^{0,8} * 1,404^{0,4} = 2762 \text{ [W/m}^2\text{*K]}$$

Opravné koeficienty:	$C_l = 1$
	$C_t = 1$
	$C_m = 1$

7.3.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 23,61 + 25,21 = 48,82 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (7.48)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 48,82}{1 + \frac{48,82}{2762}} = 40,78 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (7.49)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

7.3.5 Tepelný výkon závěsných trubek

Tepelný spád závěsných trubek

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{781,24 - 618,24}{\ln \frac{781,24}{618,24}} = 696,56 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.50)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{zin} = 1082,2 - 301 = 781,24 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{zout} = 908,32 - 290,08 = 618,24 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Plocha závěsných trubek

$$S = \pi * D * n_{tr} * h * z = \pi * 0,038 * 18 * 0,83 * 2 = 3,56 \text{ [m]} \quad (7.51)$$

Teplo přijaté závěsnými trubkami

$$Q_{p3}^Z = S * k * \Delta t = 3,56 * 40,78 * 696,56 = 101,33 \text{ [kW]} \quad (7.52)$$

7.4 Tepelná bilance a kontrola v oblasti P3

Celkové teplo předané

$$Q_{p3}^{Celk} = Q_{p3}^{Skut} + Q_{p3}^m + Q_{p3}^Z = 4164,6 + 266,55 + 101,33 = 4532,49 \text{ [kW]} \quad (7.53)$$

Bilance spalin

$$Q_{p3}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (25912 - 21334) = 4540 \text{ [kW]} \quad (7.54)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{p3}^{sp} - Q_{p3}^{skut}}{Q_{p3}^{sp}} * 100 = \frac{4540 - 4532,49}{4540} * 100 = 0,16 \text{ [%]} \quad (7.55)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

8 Oblast před mříží

Rozměry oblasti

Výška h:	3,18 [m] až 3,5 [m]
Šířka A:	2,58 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

8.1 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,038	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0324	m
Tloušťka stěny tl.	0,0056	m
Počet trubek n_{tr}	18	-
Počet řad z	2	-

Tabulka 16 Základní parametry závěsných trubek

Základní parametry spalin a přehřáté páry

Parametry spalin			Parametry páry		
Vstupní entalpie	21334	kJ	Teplota na vstupu	290,08	°C
Výstupní entalpie	19338	kJ	Teplota na výstupu	301,31	°C
Teplota na vstupu	908,32	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	830,6	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 17 Základní parametry spalin a přehřáté páry

8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{908,32 + 830,6}{2} = 869,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Objem spalin pro stření teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{869,5 + 273,15}{273,15} \right) = 65 \text{ [m}^3\text{]} \quad (8.1)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,1045 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$152 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,6217 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_z * \left(\frac{\pi * D_z^2}{4} \right) \quad (8.2)$$

$$F_{sp} = 2,58 * 2,951 - 36 * \frac{\pi * 0,038^2}{4} = 7,57 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{65}{7,57} = 8,58 [m/s] \quad (8.3)$$

Pozn. Průtočný průřez, rychlost spalin a fyzikální vlastnosti spalin budou shodné v celé kapitole . Oblast pře mříží

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 7,57}{15,35} = 1,97 [m] \quad (8.4)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (8.5)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,1045}{1,97} * \left(\frac{8,58 * 1,97}{152 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,6217^{0,4} = 10,96 [W/m^2K]$$

Opravné koeficienty:	$C_t = 1$
	$C_l = 1$
	$C_m = 1$

8.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (8.6)$$

$$s = 0,9 * 0,035 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,155 * 0,9}{0,038^2} - 1 \right) = 4,17 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (8.7)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (8.8)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (8.9)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,24}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{869,5 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 6,138 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (1,64) * 0,1 * 4,17 = 0,684 \quad (8.10)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,684} = 0,495 \quad (8.11)$$

Pozn. Optická hustota spalin a stupeň černosti proudu spalin je shodná v celé kapitole 8. Oblast před mříží

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_Z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 295,54 + 25 + 273,15 = 593,69 [K] \quad (8.12)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota páry, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)}{\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (8.13)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,495 * 869,5^3 * \frac{1 - \left(\frac{593,69}{869,5}\right)^{3,6}}{\left(\frac{593,69}{869,5}\right)} = 79,458 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$
 T_s je absolutní střední teplota spalin

8.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{Zstř} = \frac{t_{Zout} + t_{Zin}}{2} = \frac{301,31 + 290,08}{2} = 295,54 [^{\circ}C] \quad (8.14)$$

Střední tlak páry

$$P_{Zout} = P_{Zin} = P_{Zstř} = 7,45 [MPa]$$

Střední měrný objem páry

$$v_{stř} = 0,0264 [m^3/kg]$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4}\right) * n_{tr} * z = \left(\frac{\pi * 0,0324}{4}\right) * 18 * 2 = 0,0296 [m^2] \quad (8.15)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,0264}{0,0296} = 13,93 [m/s] \quad (8.16)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0592 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$5,09 \cdot 10^{-7}$ [m ² /s]
Pradtlovo číslo:	1,404 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (8.17)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,0592}{0,0324} * \left(\frac{13,93 * 0,0324}{5,09 * 10^{-7}} \right)^{0,8} * 1,404^{0,4} = 2762 \text{ [W/m}^2\text{*K]}$$

Opravné koeficienty:	$C_l = 1$
	$C_t = 1$
	$C_m = 1$

8.1.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 10,96 + 79,458 = 90,42 \text{ [W/m}^2\text{*K]} \quad (8.18)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 90,42}{1 + \frac{90,42}{2762}} = 74,42 \text{ [W/m}^2\text{*K]} \quad (8.19)$$

Součinitel tepelné efektivnosti $\psi=0,85$

8.1.5 Tepelný výkon závěsných trubek

Teplotní spád závěsných trubek

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{781,24 - 618,24}{\ln \frac{781,24}{618,24}} = 573,31 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.20)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{out} = 908,32 - 301 = 607,32 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{zin} = 830,68 - 290,08 = 540,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Plocha závěsných trubek

$$S = \pi * D * n_{tr} * l_{stř} * z = \pi * 0,038 * 18 * 3,34 * 2 = 14,35 [m^2] \quad (8.21)$$

$l_{stř}$ je střední délka závěsných trubek

Teplo přijaté závěsnými trubkami

$$Q_{pM}^Z = S * k * \Delta t = 14,35 * 74,41 * 573,31 = 612,44 [kW] \quad (8.22)$$

8.2 Membránová stěna

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,58 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951[m]
Výška kanálu h:	3,18 [m] až 3,5 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 18 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	21334	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	19338	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	908,32	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	830,6	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 19 Základní parametry spalin a vody

8.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 7,57}{15,35} = 1,97 [m] \quad (8.23)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (8.24)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,1045}{1,97} * \left(\frac{8,58 * 1,97}{152 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,6217^{0,4} = 10,96 [W/m^2K]$$

Opravné koeficienty: $C_t = 1$
 $C_l = 1$
 $C_m = 1$

8.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_Z = t_{\text{vstř}} + \Delta t + 273,15 = 290,8 + 25 + 273,15 = 588,23 \quad (8.25)$$

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (8.26)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,137 * 1268,4^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{1142,65}\right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{1142,65}\right)} = 71,05 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalín

8.2.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 10,96 + 71,05 = 82 [W/m^2 * K] \quad (8.27)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 82 = 69,7 [W/m^2 K] \quad (8.28)$$

8.2.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{618,4 - 540,6}{\ln \frac{618,4}{540,6}} = 578,55 [^{\circ}\text{C}] \quad (8.29)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{Vypin} = 908,32 - 290,08 = 618,24 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{Vypout} = 830,68 - 290,08 = 540,6 [^{\circ}\text{C}]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 33,788 [m^2]$$

Výsledná plocha S je součtem bočních stěn, vrchní zešíkmené části a odečtením servisního průřezu.

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{pM}^m = S * k * \Delta t = 33,788 * 69,7 * 578,55 = 1362,71 [kW] \quad (8.30)$$

8.3 Tepelná bilance a kontrola v oblasti před mříží

Celkové teplo předané

$$Q_{pM}^{Celk} = Q_{pM}^m + Q_{pM}^Z = 612,44 + 1362,71 = 1975,16 [kW] \quad (8.31)$$

Bilance spalin

$$Q_{pM}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (21334 - 19338) = 1979,43 [kW] \quad (8.32)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{pM}^{sp} - Q_{pM}^{skut}}{Q_{pM}^{sp}} * 100 = \frac{1979,43 - 19,75,16}{1979,43} * 100 = 0,215 [\%] \quad (8.33)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

9 Oblast Mříže

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,58 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951[m]
Výška kanálu h:	3,5 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,24	m
Podélná rozteč S ₂	0,187	m
Počet trubek n _{tr}	12	-
Počet řad z	3	-

Tabulka 20 Základní parametry mříže

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	19338	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	18383	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	830,6	°C	Tlak na vstupu	7,45	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	793,4	°C	Tlak na výstupu	7,45	<i>MPa</i>

Tabulka 21 Základní parametry spalin a vody

9.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{830,6 - 793,4}{2} = 812 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.1)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{812 + 273,15}{273,15} \right) = 61,73 \text{ [m}^3\text{]} \quad (9.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,101 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$144 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,6244 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = B * h - n_{tr} * \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) \quad (9.3)$$

$$F_{sp} = 2,951 * 3,5 - 12 * \frac{\pi * 0,0603^2}{4} = 7,79 \text{ [m}^2\text{]}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{61,73}{7,79} = 87,91 \text{ [m/s]} \quad (9.4)$$

Příčné obtékání trubek uspořádaných vystřídane

$$\alpha_k = C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (9.5)$$

$$\alpha_k = 0,88 * 0,343 * \frac{0,101}{0,0603} * \left(\frac{7,91 * 0,0603}{144 * 10^{-6}} \right)^{0,6} * 0,6244^{0,33} = 56,7$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,24}{0,0603} = 3,98 \text{ [m]} \quad (9.6)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,187}{0,0603} = 3,10 [m] \quad (9.7)$$

Poměrná uhlopříčná rozteč

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 3,98^2 + 3,10^2} = 3,68 \quad (9.8)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{1 - \sigma_1}{1 - \sigma_2'} = \frac{1 - 3,98}{1 - 3,68} = 1,11$$

Korekční součinitelé

$$C_z = 4 * z^{0,02} - 3,2 = 4 * 3^{0,02} - 3,2 = 0,88 \quad (9.9)$$

$$C_s = 0,34 * \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 * 1,11^{0,1} = 0,343 \quad (9.10)$$

9.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (9.11)$$

$$s = 0,9 * 0,0603 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,24 * 0,187}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,798 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (9.12)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (9.13)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (9.14)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,798}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{812 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 3,71 [l/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (3,71) * 0,1 * 0,798 = 0,296 \quad (9.15)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,296} = 0,256 \quad (9.16)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 290,08 + 25 + 273,15 = 588,23 [K] \quad (9.17)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{\left(\frac{T_z}{T_s} \right)} \quad (9.18)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,256 * 1085^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{1085} \right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{1085} \right)} = 32,71 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalin

9.1.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 56,7 + 32,71 = 89,42 [W/m^2 \cdot K] \quad (9.19)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 89,42 = 76 [W/m^2 K] \quad (9.20)$$

9.1.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{540,6 - 503,37}{\ln \frac{540,6}{503,37}} = 521,76 [^{\circ}C] \quad (9.21)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{vypin} = 830,68 - 290,08 = 540,6 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{vypout} = 793,45 - 290,08 = 503,37 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = \pi * D * h * n_{tr} * z = \pi * 0,0603 * 3,5 * 12 * 3 = 23,86 [m^2] \quad (9.22)$$

Tepllo přijaté membránovou stěnou

$$Q_M^m = S * k * \Delta t = 23,86 * 76 * 521,76 = 946,61 [kW] \quad (9.23)$$

9.2 Tepelná bilance a kontrola v oblasti mříže

Celkové teplo předané

$$Q_M^{Celk} = Q_M^m = 946,61 [kW] \quad (9.24)$$

Bilance spalin

$$Q_M^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (19338 - 18383) = 946,78 [kW] \quad (9.25)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_M^{sp} - Q_M^{skut}}{Q_M^{sp}} * 100 = \frac{946,78 - 946,61}{946,78} * 100 = 0,018 [\%] \quad (9.26)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

10 Oblast za mříží – membránová stěna

Rozměry oblasti

Výška h:	3,155 [m] až 3,5 [m]
Šířka A:	2,822 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 22 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	18383	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	16901	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	793,45	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	734,49	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 23 Základní parametry spalin a vody

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Sřední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{793,45 - 793,4}{2} = 763,97 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1)$$

Objem spalin pro střeni teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{763,97 + 273,15}{273,15} \right) = 57,32 \text{ [m}^3\text{]} \quad (10.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ:	0,0932 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν:	126*10 ⁻⁶ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,634 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B \tag{10.3}$$

$$F_{sp} = 2,822 * 2,951 = 8,32 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{87,32}{8,32} = 6,88 [m/s] \tag{10.4}$$

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 8,32}{11,546} = 2,88 [m] \tag{10.5}$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \tag{10.6}$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,0932}{2,88} * \left(\frac{6,88 * 2,88}{126 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,634^{0,4} = 8,91 [W/m^2K]$$

Opravné koeficienty:

$$C_t = 1$$

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

10.1.1 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 * \frac{V}{F_{st}} \tag{10.7}$$

$$s = 3,6 * \frac{19,38}{35,99} = 1,938 [m]$$

kde V je objem oblasti za mříží, F_{st} je povrch stěn této oblasti – vtaž platí pro volný objem bez trubkového svazku či desek

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (10.8)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (10.9)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (10.10)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 1,938}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{763,9 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$
$$= 8,43 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (8,43) * 0,1 * 1,938 = 1,635 \quad (10.11)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-1,635} = 0,805 \quad (10.12)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 290,08 + 25 + 273,15 = 588,23 [K] \quad (10.13)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_s^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)}{\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (10.14)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,805 * 1037^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{1037}\right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{1037}\right)} = 92,62 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalin

10.1.2 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 8,91 + 92,62 = 101,53 [W/m^2 * K] \quad (10.15)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 101,53 = 86,30 [W/m^2 * K] \quad (10.16)$$

10.1.3 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{503,37 - 444,41}{\ln \frac{503,37}{444,41}} = 473,28 [^{\circ}C] \quad (10.17)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{vypin} = 793,4 - 290,08 = 503,37 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{vypout} = 734,49 - 290,08 = 444,41 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 35,99 [m^2] \quad (10.18)$$

Výsledná plocha S je součtem bočních stěn, vrchní zešíkmené části a odečtením servisního průřezu.

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{Zm}^m = S * k * \Delta t = 35,99 * 86,30 * 473,28 = 1470,18 [kW] \quad (10.19)$$

10.2 Tepelná bilance a kontrola v oblasti za mříží

Celkové teplo předané

$$Q_{Zm}^{Celk} = Q_{Zm}^m = 1470,18 [kW] \quad (10.20)$$

Bilance spalin

$$Q_{Zm}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (18383 - 16901) = 1469,25 [kW] \quad (10.21)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{Zm}^{sp} - Q_{Zm}^{skut}}{Q_{Zm}^{sp}} * 100 = \frac{1469,25 - 1470,18}{1469,25} * 100 = -0,063 [\%] \quad (10.22)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

11 Oblast Přehříváku P1

Rozměry oblasti

Výška h:	0,507 [m]
Šířka A:	2,822 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

11.1 Přehřívák P1

Základní parametry přehříváku

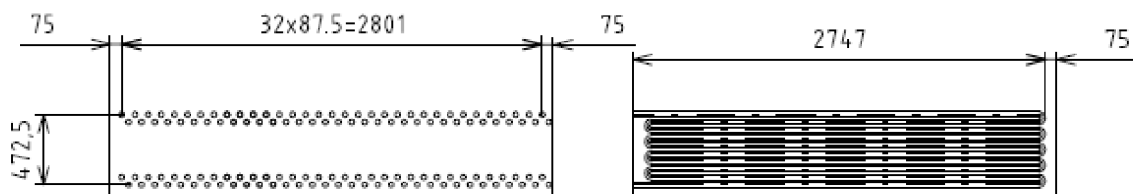
Vnější průměr trubky D	0,035	m
Vnitřní průměr trubky d	0,03	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S_1	0,0875	m
Podélná rozteč S_2	0,0525	m
Počet trubek n_{tr}	33	-
Počet řad z	10	-
Počet hadů x	1	-
Střední délka hadů $l_{stř}$	2,709	m

Tabulka 24 Základní parametry přehříváku P1

Základní parametry spalín a přehřáté páry

Parametry spalín			Parametry páry		
Vstupní entalpie	16901	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	301,31	$^{\circ}C$
Výstupní entalpie	13802	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	356	$^{\circ}C$
Teplota na vstupu	734,49	$^{\circ}C$	Tlak na vstupu	7,45	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	609,48	$^{\circ}C$	Tlak na výstupu	7,3	<i>MPa</i>

Tabulka 25 Parametry spalín a přehřáté páry přehříváku P1



Obrázek 4 schéma přehříváku P1

11.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{734,49 + 609,48}{2} = 671,98 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.1)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{671,98 + 273,15}{273,15} \right) = 53,77 \text{ [m}^3\text{]} \quad (11.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,08453 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$107,8 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,6433 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D \quad (11.3)$$
$$F_{sp} = 2,822 * 2,951 - 33 * 2,709 * 0,035 = 5,198 \text{ [m}^2\text{]}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{53,77}{5,198} = 10,34 \text{ [m/s]}$$

Pozn. Průtočný průřez, rychlost spalin a fyzikální vlastnosti spalin budou shodné v celé kapitole 11. Oblast přehříváku P1

(11.3)

Příčné obtékání trubek uspořádaných vystřídane

$$\alpha_k = C_Z * C_S * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (11.5)$$
$$\alpha_k = 1 * 0,355 * \frac{0,08453}{0,035} * \left(\frac{10,34 * 0,035}{107,8 * 10^{-6}} \right)^{0,6} * 0,6433^{0,33} = 96,96$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,0875}{0,035} = 2,5 \text{ [m]} \quad (11.6)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,0525}{0,035} = 1,5 \text{ [m]} \quad (11.7)$$

Poměrná uhlopříčná rozteč

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 2,5^2 + 1,5^2} = 1,952 \quad (11.8)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{1 - \sigma_1}{1 - \sigma_2'} = \frac{1 - 2,5}{1 - 1,952} = 1,574 \quad (11.9)$$

Korekční součinitelé

$$C_z = 1$$

$$C_s = 0,34 * \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 * 1,574^{0,1} = 0,355 \quad (11.10)$$

11.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (11.11)$$

$$s = 0,9 * 0,035 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,0875 * 0,0525}{0,035^2} - 1 \right) = 0,1189 \text{ [m]}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (11.12)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 \text{ [MPa]} \quad (11.13)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (11.14)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,118}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{671,9 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 10,76 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (10,76) * 0,1 * 0,118 = 0,128 \quad (11.15)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,128} = 0,120 \quad (11.16)$$

Pozn. Optická hustota spalin a stupeň černosti proudu spalin je shodná v celé kapitole 11. Oblast přehříváku P1

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_Z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 328,65 + 25 + 273,15 = 626,8 [K] \quad (11.17)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota páry, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S} \right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S} \right)} \quad (11.18)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,120 * 945,13^3 * \frac{1 - \left(\frac{626,8}{945,13} \right)^{3,6}}{\left(\frac{626,8}{945,13} \right)} = 11,92 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalin

11.1.3 Součinitel přestupu tepla na straně páry

Střední teplota páry

$$t_{ppsř} = \frac{t_{p\text{out}} + t_{p\text{in}}}{2} = \frac{356 + 301,31}{2} = 328,655 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.19)$$

Střední tlak páry

$$p_{sř} = \frac{P_{p\text{out}} + P_{p\text{in}}}{2} = \frac{7,45 + 7,3}{2} = 7,375 \text{ [MPa]} \quad (11.20)$$

Střední měrný objem páry

$$v_{sř} = 0,0308 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) * n_{tr} = \left(\frac{\pi * 0,03^2}{4} \right) * 33 = 0,0233 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.21)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{sř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,0308}{0,0233} = 20,68 \text{ [m/s]} \quad (11.22)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0603 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$6,468 * 10^{-7}$ [m ² /s]
Pradtlovo číslo:	1,3359 [-]

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_p * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (11.23)$$

$$\alpha_p = 0,023 * \frac{0,0603}{0,03} * \left(\frac{20,68 * 0,03}{6,468 * 10^{-7}} \right) * 1,3359 * 1 * 1 * 1 = 3168,54 [W/m^2K]$$

Ekvivalentní průměr d_e je při proudění uvnitř trubky roven vnitřnímu průměru trubky

Opravné koeficienty:

$$C_t = 1$$

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

11.1.4 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 96,96 + 11,92 = 108,89 [W/m^2K] \quad (11.24)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \frac{\psi * \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 * 108,89}{1 + \frac{108,89}{3168,54}} = 89,48 [W/m^2K] \quad (11.25)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

11.1.5 Tepelný výkon přehříváku P1

Teplotní spád na přehříváku

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{378,49 - 308,17}{\ln \frac{378,49}{308,17}} = 342,13 [^{\circ}C] \quad (11.26)$$

$$\Delta t_v = t_{spín} - t_{plout} = 734,49 - 356 = 378,49 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{plin} = 609,48 - 301,31 = 308,17 [^{\circ}C]$$

Potřebná plocha pro přehřívák

$$S_{p1p} = \frac{Q_{p1} * 1000}{k * \Delta t} = \frac{3023,22 * 1000}{89,48 * 342,13} = 98,748 [m^2] \quad (11.27)$$

Skutečná plocha přehříváku

$$S_{p1} = \pi * D * l_{stř} * n_{tr} * z = \pi * 0,035 * 2,709 * 33 * 10 = 98,315 [m^2] \quad (11.28)$$

Skutečný výkon přehříváku

$$Q_{p1}^{skut} = S_{p1} * \Delta t * k = 98,315 * 342,13 * 89,48 = 3009,94 [kW] \quad (11.29)$$

Kontrola výkonu

$$\Delta Q = \frac{Q_{p1}^{skut} - Q_{p1}}{Q_{p1}^{skut}} * 100 = \frac{3009,94 - 3023,22}{3023,22} * 100 = -0,439 [\%] \quad (11.30)$$

Daná odchylka odpovídá možné toleranci výkonu $\pm 3\%$

11.2 Membránová stěna

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,822 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951 [m]
Výška kanálu h:	0,507 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 26 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	16901	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	13802	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	734,49	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	609,48	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 27 Základní parametry spalin a vody

11.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 5,19}{191,5} = 0,108 [m] \quad (11.31)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty:

$$C_t = 1$$

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (11.32)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,0845}{0,108} * \left(\frac{10,34 * 0,108}{107,8 * 10^{-6}} \right) * 0,643^{0,4} = 24,58 [W/m^2K]$$

11.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (6,138) * 0,1 * 0,24 = 0,1473 \quad (11.32)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,1473} = 0,137 \quad (11.33)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_Z = t_{vstř} + \Delta t + 273,15 = 290,8 + 25 + 273,15 = 588,23 \quad (11.34)$$

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S} \right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S} \right)} \quad (11.35)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,120 * 945,14^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{945,14} \right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{945,14} \right)} = 11,28 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalin

11.2.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 24,58 + 11,28 = 35,86 [W/m^2 * K] \quad (11.36)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 35,86 = 30,48 [W/m^2K] \quad (11.37)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

11.2.4 Výkon předaný do membránové stěny

Tepelný spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{444,41 - 319,4}{\ln \frac{444,41}{319,4}} = 378,47 [^{\circ}C] \quad (11.38)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{\dot{V}_{ypin}} = 734,49 - 290,08 = 444,41 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{\dot{V}_{ypout}} = 609,48 - 290,08 = 319,4 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 2 * (A + B) * h = 2 * (2,822 + 2,951) * 0,507 = 5,859 [m] \quad (11.39)$$

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{p1}^m = S * k * \Delta t = 5,859 * 30,48 * 378,47 = 67,60 [kW] \quad (11.40)$$

11.3 Tepelná bilance a kontrola v oblasti P1

Celkové teplo předané

$$Q_{p1}^{Celk} = Q_{p1}^{Skut} + Q_{p1}^m = 3009,94 + 67,60 = 3077,55 [kW] \quad (11.41)$$

Bilance spalín

$$Q_{p3}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (16901 - 13802,7) = 3072,5 [kW] \quad (11.42)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{p1}^{sp} - Q_{p1}^{skut}}{Q_{p1}^{sp}} * 100 = \frac{3072,5 - 3077,55}{3072,5} * 100 = -0,16 [\%] \quad (11.43)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

12 Membránová stěna pod přehřívákem P1

Rozměry oblasti

Výška h:	0,8 [m]
Šířka A:	2,822 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 28 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	13802	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	13695	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	609,48	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	605,14	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 29 Základní parametry spalin a vody

12.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{609,48 + 605,14}{2} = 607,31 [^{\circ}\text{C}] \quad (12.1)$$

Objem spalin pro stření teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{607,31 + 273,15}{273,15} \right) = 50,09 [m^3] \quad (12.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ:	0,0783 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν:	95,2*10 ⁻⁶ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,65 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B \tag{12.3}$$

$$F_{sp} = 2,822 * 2,951 = 8,32 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{50,09}{8,32} = 6 [m/s] \tag{12.4}$$

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 8,32}{11,546} = 2,88 [m] \tag{12.5}$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \tag{12.6}$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,0783}{2,88} * \left(\frac{6 * 2,88}{95,2 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,65^{0,4} = 8,49 [W/m^2K]$$

Opravné koeficienty: $C_t = 1$
 $C_l = 1$
 $C_m = 1$

12.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 * \frac{V}{F_{st}} \tag{12.7}$$

$$s = 3,6 * \frac{6,662}{8,73} = 2,745 [m]$$

kde V je objem oblasti za mříží, F_{st} je povrch stěn této oblasti – vtaž platí pro volný objem bez trubkového svazku či desek

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (12.8)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 \text{ [MPa]} \quad (12.9)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (12.10)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 2,745}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{607,31 + 273,15}{1000} \right) * 0,283 \\ = 2,168 \text{ [1/m*MPa]}$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (2,168) * 0,1 * 1,938 = 0,595 \quad (12.11)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,595} = 0,448 \quad (12.12)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_Z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 290,08 + 25 + 273,15 = 588,23 \text{ [K]} \quad (12.13)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (12.14)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,448 * 880,46^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{880,46}\right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{880,46}\right)} = 36,25 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalin

12.1.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 8,49 + 36,25 = 44,74 [W/m^2 * K] \quad (12.15)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 44,74 = 38,03 [W/m^2 K] \quad (12.16)$$

12.1.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{319,4 - 315,06}{\ln \frac{319,4}{315,06}} = 317,23 [^{\circ}C] \quad (12.17)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{vypin} = 609,48 - 290,08 = 319,40 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{vypout} = 605,14 - 290,08 = 315,06 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 2 * (A + B) * h - S_{průřít} = 2 * (2,822 + 2,951) * 0,8 - 0,50 = 8,734 [m^2] \quad (12.18)$$

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{pp1}^m = S * k * \Delta t = 8,734 * 38,03 * 317,23 = 105,38 [kW] \quad (12.19)$$

12.2 Tepelná bilance a kontrola v oblasti pod P1

Celkové teplo předané

$$Q_{PP1m}^{celk} = Q_{pp1}^m = 105,38 [kW] \quad (12.20)$$

Bilance spalin

$$Q_{PP1m}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (13802,7 - 13695,7) = 106,11 [kW] \quad (12.21)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{PP1m}^{sp} - Q_{PP1m}^{celk}}{Q_{PP1m}^{sp}} * 100 = \frac{106,11 - 105,38}{106,11} * 100 = 0,68 [\%] \quad (12.22)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

13 Oblast ekonomizéru 2

Rozměry oblasti

Výška h:	0,56 [m]
Šířka A:	2,822 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

13.1 Ekonomizér 2

Základní parametry ekonomizéru

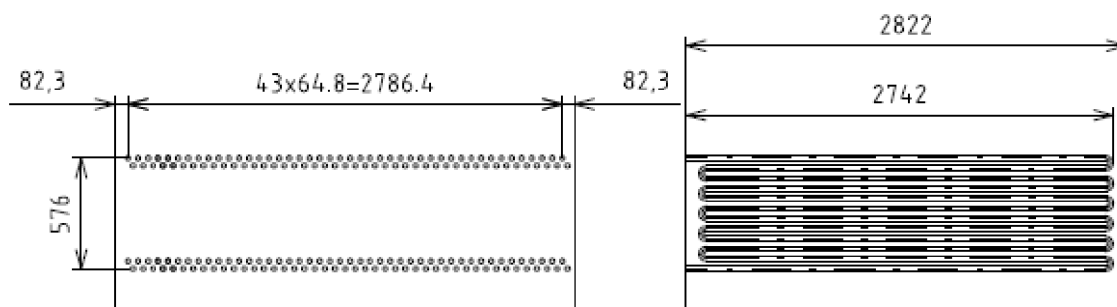
Vnější průměr trubky D	0,032	m
Vnitřní průměr trubky d	0,027	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S_1	0,0648	m
Podélná rozteč S_2	0,048	m
Počet trubek n_{tr}	44	-
Počet řad z	12	-
Počet hadů x	1	-
Střední délka hadů $l_{stř}$	2,702	m

Tabulka 30 Základní parametry Ekonomizéru 2

Základní parametry spalín a přehřáté páry

Parametry spalín			Parametry vody		
Vstupní entalpie	13695	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	223,34	$^{\circ}C$
Výstupní entalpie	10070	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	270,08	$^{\circ}C$
Teplota na vstupu	605,14	$^{\circ}C$	Tlak na vstupu	7,45	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	453,44	$^{\circ}C$	Tlak na výstupu	7,65	<i>MPa</i>

Tabulka 31 Parametry spalín a přehřáté páry Ekonomizéru 2



Obrázek 5 schéma ekonomizéru 2

Střední teplota vody

$$t_{ppstř} = \frac{t_{ekoin} + t_{ekoout}}{2} = \frac{270,08 + 223,34}{2} = 246,71 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (13.1)$$

Střední tlak vody

$$P_{ppstř} = \frac{P_{ekoout} + P_{ekoin}}{2} = \frac{7,45 + 7,65}{2} = 7,55 \text{ [MPa]} \quad (13.2)$$

Střední měrný objem

$$v_{stř} = 0,00124 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F_p = \frac{\pi * d^2}{4} * n_{tr} = \frac{\pi * 0,027^2}{4} * 44 = 0,0252 \text{ [m}^2\text{]} \quad (13.3)$$

Rychlost vody

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,00124}{0,0252} = 0,77 \text{ [m/s]} \quad (13.4)$$

13.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{605,14 + 452,37}{2} = 528,76 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (13.5)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{529,29 + 273,15}{273,15} \right) = 45,62 \text{ [m}^3\text{]} \quad (13.6)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,07153 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$82,168 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,6572 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D \quad (13.7)$$

$$F_{sp} = 2,822 * 2,951 - 44 * 2,702 * 0,032 = 4,52 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{45,65}{4,52} = 10,08 [m/s]$$

Pozn. Průtočný průřez, rychlost spalin a fyzikální vlastnosti spalin budou shodné v celé kapitole 13. Oblast Ekonomizéru 2

(13.8)

Příčné obtékání trubek uspořádaných vystřídane

$$\alpha_k = C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (13.9)$$

$$\alpha_k = 1 * 0,348 * \frac{0,07153}{0,032} * \left(\frac{10,08 * 0,032}{82,168 * 10^{-6}} \right)^{0,6} * 0,6572^{0,33} = 97,13$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,0648}{0,032} = 2,025 \quad (13.10)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,048}{0,032} = 1,5 \quad (13.11)$$

Poměrná uhlopříčná rozteč

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 2,025^2 + 1,5^2} = 1,80 \quad (13.12)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{1 - \sigma_1}{1 - \sigma_2'} = \frac{1 - 2,025}{1 - 1,80} = 1,26 \quad (13.13)$$

Korekční součinitelé

$$C_z = 1$$

$$C_s = 0,34 * \varphi_{\sigma}^{0,1} = 0,34 * 1,26^{0,1} = 0,348 \quad (13.14)$$

13.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (13.15)$$

$$s = 0,9 * 0,032 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,0648 * 0,048}{0,032^2} - 1 \right) = 0,0825 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (13.16)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (13.17)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (13.18)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,0825}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{529,29 + 273,15}{1000} \right) * 0,283 \\ = 14,012 [l/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (14,012) * 0,1 * 0,0825 = 0,115 \quad (13.19)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,115} = 0,109 \quad (13.20)$$

Pozn. Optická hustota spalin a stupeň černosti proudu spalin je shodná v celé kapitole 13. Oblast Ekonomizéru 2

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_Z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 246,7 + 25 + 273,15 = 544,86 \text{ [K]} \quad (13.21)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (13.22)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,109 * 802,44^3 * \frac{1 - \left(\frac{544,86}{802,44}\right)^{3,6}}{\left(\frac{544,86}{802,44}\right)} = 6,77 \text{ [W/m}^2\text{*K]}$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalín

13.1.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 97,13 + 6,77 = 103,91 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (13.23)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 103,91 = 88,32 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (13.24)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

13.1.4 Tepelný výkon Ekonomizéru 2

Tepelní spád na Ekonomizéru

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{335,06 - 230,1}{\ln \frac{335,06}{230,1}} = 279,3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (13.25)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{pout} = 605,14 - 270,08 = 335,06 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{plin} = 453,44 - 223,34 = 230,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Plocha Ekonomizéru

$$S_{eko} = \pi * D * l_{stř} * n_r * z = \pi * 0,032 * 2,702 * 44 * 12 = 143,42 \text{ [m]} \quad (13.26)$$

Teplo předané do ekonomizéru

$$Q_{eko2}^{skut} = S_{eko} * \Delta t * k = 143,42 * 279,3 * 88,32 = 3539,84 \text{ [kW]} \quad (13.27)$$

13.2 Membránová stěna

Rozměry počítané oblasti

Šířka kanálu A:	2,822 [m]
Hloubka kanálu B:	2,951[m]
Výška kanálu h:	0,56 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 32 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	13695	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	10070	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	605,14	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	453,44	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 33 Základní parametry spalin a vody

13.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 4,52}{250,73} = 0,072 [m] \quad (13.28)$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty:	$C_t = 1$
	$C_l = 1$
	$C_m = 1$

Podélné obtékání plochy

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_l * C_t * C_m \quad (13.29)$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,07153}{0,072} * \left(\frac{10,08 * 0,072}{82,17 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,6572^{0,4} = 27,72 [W/m^2K]$$

13.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (14,01) * 0,1 * 0,082 = 0,115 \quad (13.30)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,115} = 0,109 \quad (13.31)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_Z = t_{vstř} + \Delta t + 273,15 = 290,8 + 25 + 273,15 = 588,23 \quad (13.32)$$

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S} \right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S} \right)} \quad (13.33)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,109 * 802,44^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{802,44} \right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{802,44} \right)} = 7,30 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalin

13.2.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 7,30 + 27,72 = 35,09 [W/m^2 * K] \quad (13.34)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 35,01 = 29,78 [W/m^2K] \quad (13.35)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,85$

13.2.4 Výkon předaný do membránové stěny

Tepelný spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{315 - 163,36}{\ln \frac{315}{163,36}} = 230,96 [^{\circ}C] \quad (13.36)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{vypin} = 605,14 - 290,08 = 315 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{vypout} = 453,44 - 290,08 = 163,36 [^{\circ}C]$$

Plocha membránové stěny

$$S = 2 * (A + B) * h = 2 * (2,822 + 2,951) * 0,56 = 7,07 [m] \quad (13.37)$$

Teplo přijaté membránovou stěnou

$$Q_{eko}^m = S * k * \Delta t = 7,07 * 29,76 * 230,96 = 48,64 [kW] \quad (13.38)$$

13.3 Tepelná bilance a kontrola v oblasti Ekonomizéru

Celkové teplo předané

$$Q_{eko2}^{Celk} = Q_{eko2}^{Skut} + Q_{eko}^m = 3539,84 + 48,64 = 3588,48 [kW] \quad (13.39)$$

Bilance spalín

$$Q_{eko}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (13695,7 - 10070,77) = 3593,82 [kW] \quad (13.40)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{eko}^{sp} - Q_{eko}^{skut}}{Q_{eko}^{sp}} * 100 = \frac{3593,82 - 3588,48}{3593,82} * 100 = 0,14 [\%] \quad (13.41)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

14 Oblast pod ekonomizérem (výstup z kotle)

Rozměry oblasti

Výška h:	0,8 [m] až 1,05 [m]
Šířka A:	2,822 [m]
Hloubka B:	2,951 [m]

Základní parametry

Vnější průměr trubky D	0,0603	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0553	m
Tloušťka stěny tl.	0,005	m
Příčná rozteč S ₁	0,08	m

Tabulka 34 Základní parametry membránové stěny

Základní parametry spalín a vody

Parametry spalín			Parametry vody		
Vstupní entalpie	10070	kJ	Teplota na vstupu	263,34	°C
Výstupní entalpie	9977	kJ	Teplota na výstupu	290,08	°C
Teplota na vstupu	453,44	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	449,47	°C	Tlak na výstupu	7,45	MPa

Tabulka 35 Základní parametry spalín a vody

14.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Střední teplota spalín

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{453,44 + 449,47}{2} = 451,46 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (14.1)$$

Objem spalín pro střeni teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{451,46 + 273,15}{273,15} \right) = 41,22 \text{ [m}^3\text{]} \quad (14.2)$$

Fyzikální vlastnosti spalín pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,06434 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	69.064*10 ⁻⁶ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,6449 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = h_{stř} * B \tag{14.3}$$

$$F_{sp} = 0,925 * 2,951 = 2,729 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{41,22}{2,729} = 15,1 [m/s] \tag{14.4}$$

Ekvivalentní průměr d_e

$$d_e = \frac{4 * F_{sp}}{O} = \frac{4 * 2,729}{7,703} = 0,945 [m] \tag{14.5}$$

kde O je obvod průřezu kanálu

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{sp} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \tag{14.6}$$

$$\alpha_k = 0,023 * \frac{0,06434}{0,945} * \left(\frac{15,1 * 0,945}{69,064 * 10^{-6}} \right) * 0,6449^{0,4} = 23,47 [W/m^2K]$$

Opravné koeficienty: $C_t = 1$
 $C_l = 1$
 $C_m = 1$

14.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 * \frac{V}{F_{st}} \tag{14.7}$$

$$s = 3,6 * \frac{7,703}{15,23} = 1,82 [m]$$

kde V je objem oblasti za mříží, F_{st} je povrch stěn této oblasti – vtaž platí pro volný objem bez trubkového svazku či desek

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (14.8)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 \text{ [MPa]} \quad (14.9)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (14.10)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 1,82}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{451,46 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 2,939 \text{ [1/m*MPa]}$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (2,939) * 0,1 * 1,82 = 0,535 \quad (14.11)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,535} = 0,44 \quad (14.12)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 290,08 + 25 + 273,15 = 588,23 \text{ [K]} \quad (14.13)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_S} \right)}{\left(\frac{T_z}{T_S} \right)} \quad (14.14)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,414 * 724,61^3 * \frac{1 - \left(\frac{588,23}{724,61} \right)^{3,6}}{\left(\frac{588,23}{724,61} \right)} = 22,68 \text{ [W/m}^2 \text{*K]}$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_s je absolutní střední teplota spalin

14.1.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 23,47 + 22,68 = 46,16 \text{ [W/m}^2\text{*K]} \quad (14.15)$$

Součinitel prostupu tepla k

$$k = \psi * \alpha_s = 0,85 * 46,16 = 39,23 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (14.16)$$

14.1.4 Výkon předaný do membránové stěny

Teplotní spád membránové stěny

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{163,36 - 159,39}{\ln \frac{163,36}{159,39}} = 161,37 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (14.17)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{ypin} = 453,44 - 290,08 = 163,36 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (14.17)$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{ypout} = 449,44 - 290,08 = 159,39 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (14.17)$$

Plocha membránové stěny

$$S = 15,23 \text{ [m}^2\text{]} \quad (14.18)$$

Teplu přijaté membránovou stěnou

$$Q_{výst} = S * k * \Delta t = 15,23 * 39,23 * 161,37 = 96,45 \text{ [kW]} \quad (14.19)$$

14.2 Tepelná bilance a kontrola v oblasti pod ekonomizérem

Celkové teplo předané

$$Q_{výst}^{Celk} = Q_{výst}^m = 96,39 [kW] \quad (14.20)$$

Bilance spalin

$$Q_{výst}^{sp} = \varphi * (I_{spin} - I_{spout}) = 0,09917 * (10070,77 - 9973,77) = 96,19 [kW] \quad (14.21)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{výst}^{sp} - Q_{výst}^{celk}}{Q_{výst}^{sp}} * 100 = \frac{96,19 - 96,39}{96,19} * 100 = -0,21 [\%] \quad (14.22)$$

Odchylka je zanedbatelná, proto není nutné přepočítávat odchozí teplotu.

14.3 Tepelná bilance a kontrola výparníku

$$Q_{vyp}^{celk} = Q_{SP}^m + Q_{p2}^m + Q_{p3}^m + Q_{pM}^m + Q_M^m + Q_{zM}^m + Q_{p1}^m + Q_{pp1}^m + Q_{eko}^m + Q_{výst}^m \quad (14.23)$$

$$Q_{vyp}^{celk} = 20106 + 902,23 + 267 + 1362,7 + 946,6 + 1470 + 67,60 + 105,38 + 48,64 + 69,39$$

$$Q_{vyp}^{celk} = 25372,87 [kW]$$

Kontrola předaného tepla

$$\Delta = \frac{Q_{vyp}^{celk} - Q_{vyp}}{Q_{vyp}^{celk}} = \frac{25372,8 - 25341}{25372,8} * 100 = 0,12 [\%] \quad (14.24)$$

15 Ekonomizér 1

Rozměry oblasti

Výška h:	2,96 [m]
Šířka A:	2,7 [m]
Hloubka B:	3,2 [m]

Základní parametry ekonomizéru

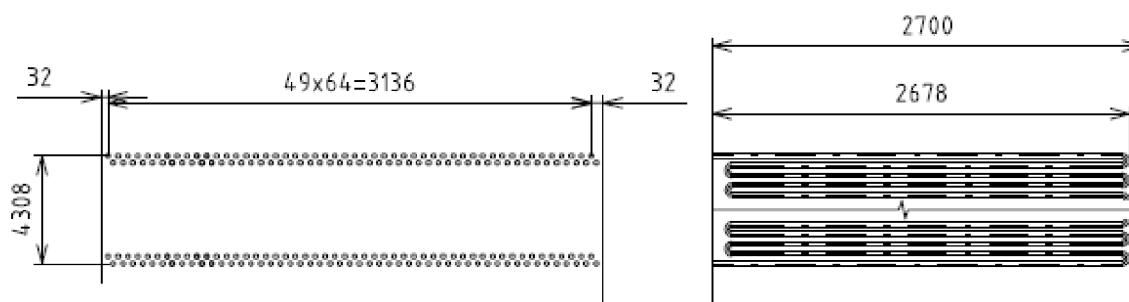
Vnější průměr trubky D	0,032	m
Vnitřní průměr trubky d	0,0275	m
Tloušťka stěny tl.	0,0045	m
Příčná rozteč S_1	0,064	m
Podélná rozteč S_2	0,048	m
Počet trubek n_{tr}	50	-
Počet řad z	72	-
Počet hadů x	1	-
Střední délka hadů $l_{stř}$	2,667	m

Tabulka 36 Základní parametry Ekonomizéru 1

Základní parametry spalin a vody

Parametry spalin			Parametry vody		
Vstupní entalpie	9973,77	kJ	Teplota na vstupu	125	°C
Výstupní entalpie	3203,77	kJ	Teplota na výstupu	223,34	°C
Teplota na vstupu	449,3	°C	Tlak na vstupu	7,45	MPa
Teplota na výstupu	149,44	°C	Tlak na výstupu	7,65	MPa

Tabulka 37 Parametry spalin a přehřáté páry Ekonomizéru 1



Obrázek 6 schéma ekonomizéru 1

Střední teplota vody

$$t_{ppstř} = \frac{t_{ekoin} + t_{ekoout}}{2} = \frac{125 + 223,34}{2} = 174,17 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15.1)$$

Střední tlak vody

$$P_{ppstř} = \frac{P_{ekoout} + P_{ekoin}}{2} = \frac{7,45 + 7,65}{2} = 7,55 \text{ [MPa]} \quad (15.2)$$

Střední měrný objem

$$v_{stř} = 0,00111 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F_p = \frac{\pi * d^2}{4} * n_{tr} = \frac{\pi * 0,0275^2}{4} * 50 = 0,0297 \text{ [m}^2\text{]} \quad (15.3)$$

Rychlost vody

$$w_p = \frac{0,94 * M_{pp} * v_{stř}}{F_p} = \frac{0,94 * 16,667 * 0,00111}{0,0297} = 0,585 \text{ [m/s]} \quad (15.4)$$

15.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{449,3 + 149,44}{2} = 299,37 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15.5)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{299,37 + 273,15}{273,15} \right) = 32,57 \text{ [m}^3\text{]} \quad (15.6)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,0502 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$45,8 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,69 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D \quad (15.7)$$

$$F_{sp} = 2,75 * 3,2 - 58 * 2,72 * 0,032 = 4,37 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{32,57}{4,448} = 7,44 [m/s] \quad (15.8)$$

Příčné obtékání trubek uspořádaných vystřídane

$$\alpha_k = C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (13.9)$$

$$\alpha_k = 1 * 0,388 * \frac{0,0502}{0,032} * \left(\frac{7,44 * 0,032}{45,8 * 10^{-6}} \right)^{0,6} * 0,69^{0,33} = 81,88$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,064}{0,032} = 2 \quad (15.10)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,048}{0,032} = 1,5 \quad (15.11)$$

Poměrná uhlopříčná rozteč

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 2,0^2 + 1,5^2} = 1,802 \quad (15.12)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{2 - 1}{1,802 - 1} = 1,24 \quad (15.13)$$

Korekční součinitelé

$$C_z = 1$$

$$C_s = 0,34 * \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 * 1,24^{0,1} = 0,347 \quad (15.14)$$

15.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 * D * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (15.15)$$

$$s = 0,9 * 0,032 * \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,064 * 0,048}{0,032^2} - 1 \right) = 0,0812 [m]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,193 + 0,09 = 0,283 \quad (15.16)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p * r_s = 0,1 * 0,283 = 0,0283 [MPa] \quad (15.17)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{t_{spstř} + 273,15}{1000} \right) * r_s \quad (15.18)$$

$$k_s * r_s = \left(\frac{7,8 + 16 * 0,193}{3,16 * \sqrt{0,0283 * 0,0825}} - 1,02 \right) * \left(1 - 0,37 * \frac{299,3 + 273,15}{1000} \right) * 0,283$$

$$= 15,83 [1/m * MPa]$$

Optická hustota spalin

$$k * p * s = (k_s * r_s) * p * s = (15,83) * 0,1 * 0,0812 = 0,128 \quad (15.19)$$

Stupeň černosti proudů spalin

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-0,128} = 0,120 \quad (15.20)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_Z = t_{ppstř} + \Delta t + 273,15 = 174,17 + 25 + 273,15 = 472,32 [K] \quad (15.21)$$

kde $t_{ppstř}$ je střední teplota vody, Δt je zvýšení teploty – pro plynná paliva se volí na všech výhřevných plochách 25 °C

součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{\alpha_{st} + 1}{2} * a * T_S^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)}{\left(\frac{T_Z}{T_S}\right)} \quad (15.22)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,120 * 572,5^3 * \frac{1 - \left(\frac{472,32}{572,5}\right)^{3,6}}{\left(\frac{472,32}{572,5}\right)} = 3,31 [W/m^2 * K]$$

Pro plyn platí $\alpha_{st} = 0,8$

T_S je absolutní střední teplota spalín

15.1.3 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalín

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 81,88 + 3,31 = 85,20 [W/m^2 K] \quad (15.23)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \psi * \alpha_s = 0,9 * 85,20 = 76,68 [W/m^2 K] \quad (15.24)$$

Součinitel tepelné efektivity $\psi=0,9$

15.1.4 Tepelný výkon Ekonomizéru 2

Teplotní spád na Ekonomizéru

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{225,96 - 24,44}{\ln \frac{225,96}{24,44}} = 90,61 [^\circ C] \quad (15.25)$$

$$\Delta t_v = t_{spin} - t_{ekoout} = 449,3 - 223,34 = 225,96 [^\circ C]$$

$$\Delta t_m = t_{spout} - t_{plin} = 149,44 - 125 = 24,44 [^\circ C]$$

Plocha Ekonomizéru

$$S_{eko} = \pi * D * l_{stř} * n_{tr} * z = \pi * 0,032 * 2,667 * 50 * 72 = 965,21 [m] \quad (15.26)$$

Teplo předané do ekonomizéru

$$Q_{eko1}^{skut} = S_{eko} * \Delta t * k = 965,21 * 90,61 * 76,68 = 6707,1 [kW] \quad (15.27)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{eko1}^{odh} - Q_{eko1}^{skut}}{Q_{eko1}^{odh}} * 100 = \frac{6717,12 - 6707,1}{6717,12} * 100 = 0,14 [\%] \quad (15.28)$$

15.1.5 Tepelná bilance a kontrola ekonomizéru

Kontrola výkonu ekonomizéru

$$Q_{eko} = Q_{eko1}^{skut} + Q_{eko2}^{skut} = 6707,1 + 35,39,8 = 10246,94 \quad (15.29)$$

Odchylka od předpokládaného výkonu

$$\Delta = \frac{Q_{eko} - Q_{eko}^{skut}}{Q_{eko}} * 100 = \frac{10256 - 10246}{10256} * 100 = 0,09 [\%] \quad (15.30)$$

Odchylka vyhovuje toleranci $\pm 0,5\%$.

16 Ohřívák vzduchu 2

Rozměry oblasti

Výška h:	1,9 [m]
Šířka A:	2,7 [m]
Hloubka B:	3,2 [m]

Základní parametry ohříváku vzduchu

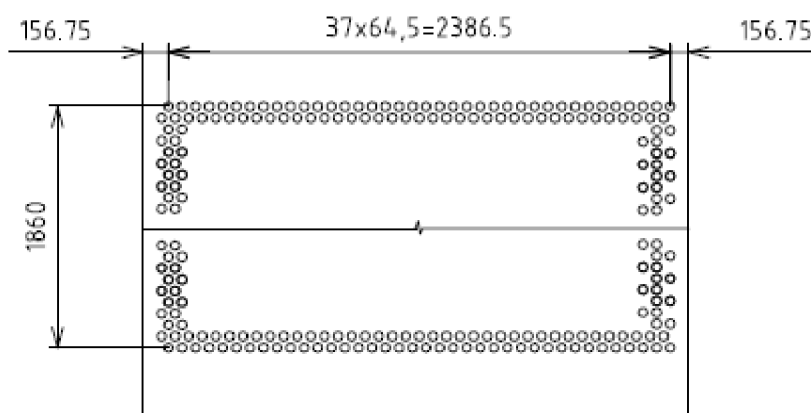
Vnější průměr trubky D	0,0445	m
Vnitřní průměr trubky d	0,043	m
Tloušťka stěny tl.	0,0015	m
Příčná rozteč S_1	0,0645	m
Podélná rozteč S_2	0,0439	m
Počet trubek n_{tr}	38	-
Počet řad z	20	-
Počet obratu x	2	-
Střední délka trubky $l_{stř}$	3,2	m

Tabulka 38 Základní parametry ohříváku vzduchu 2

Základní parametry spalín a vzduchu

Parametry spalín			Parametry vzduchu		
Vstupní entalpie	3203,77	kJ	Teplota na vstupu	50	°C
Výstupní entalpie	2255,2	kJ	Teplota na výstupu	100	°C
Teplota na vstupu	149,44	°C	Tlak na vstupu	-	MPa
Teplota na výstupu	106	°C	Tlak na výstupu	-	MPa

Tabulka 39 Parametry spalín a vzduchu pro ohřívák vzduchu 2



Obrázek 7 schéma ohříváku vzduchu 2

16.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

Střední teplota vzduchu

$$t_{vz} = \frac{t_{vzin} + t_{vzout}}{2} = \frac{50 + 100}{2} = 75 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (16.1)$$

Objem vzduchu pro střední teplotu

$$V_{vz} = M_{pv} * O_{vz} * \left(\frac{273,15 + t_{vz}}{273,15} \right) = 1,39 * 10,16 * \left(\frac{273,15 + 75}{273,15} \right) = 18 \text{ [m}^3\text{]} \quad (16.2)$$

Průtočný průřez pro vzduch

$$F_{vz} = \frac{\pi * d^2}{4} * n_{tr} * x = \frac{\pi * 0,043^2}{4} * 20 * 2 = 4,32 \text{ [m}^2\text{]} \quad (16.3)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{F_{vz}} = \frac{18}{4,32} = 16,3 \text{ [m/s]} \quad (16.4)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,03075 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$20,7 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,7228 [-]

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_v = 0,023 * \frac{\lambda}{d_e} * \left(\frac{w_{vz} * d_e}{\nu} \right)^{0,8} * Pr^{0,4} * C_t * C_l * C_m \quad (16.5)$$

$$\alpha_v = 0,023 * \frac{0,03075}{0,043} * \left(\frac{16,3 * 0,043}{20,7 * 10^{-6}} \right)^{0,8} * 0,7228^{0,4} * 0,933 * 1 * 1 = 56,75 \text{ [W/m}^2\text{*K]} \quad (16.6)$$

Korekční součinitel

$$C_t = \left(\frac{T}{T_{st}} \right)^{0,5} = \left(\frac{273,15 + 75}{100 + 273,15} \right) = 0,933 \quad (16.7)$$

kde T je teplota proudu vzduchu, T_{st} je teplota stěny trubky

16.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{spstř} = \frac{t_{spin} + t_{spout}}{2} = \frac{149,44 + 106}{2} = 127,6 [^{\circ}\text{C}] \quad (16.8)$$

Objem spalin pro střední teplotu

$$O_{spstř} = M_{pv} * O_{sp} * \left(\frac{t_{spstř} + 273,15}{273,15} \right) = 1,39 * 11,16 * \left(\frac{127,6 + 273,15}{273,15} \right) = 22,8 [m^3] \quad (16.9)$$

Fyzikální vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,03453 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$24,05 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,7254 [-]

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{sp} = A * B - n_{tr} * l_{stř} * D \quad (16.10)$$

$$F_{sp} = 2,7 * 3,2 - 38 * 3,2 * 0,0445 = 3,23 [m^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{spstř}}{F_{sp}} = \frac{22,8}{3,23} = 7,06 [m/s] \quad (16.11)$$

Příčné obtékání trubek uspořádaných vystřídane

$$\alpha_k = C_z * C_s * \frac{\lambda}{D} * \left(\frac{w_{sp} * D}{\nu} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (16.12)$$

$$\alpha_k = 1 * 0,388 * \frac{0,03453}{0,0445} * \left(\frac{7,06 * 0,0445}{24,05 * 10^{-6}} \right)^{0,6} * 0,7254^{0,33} = 80,05 [W/m^2K]$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,0645}{0,0445} = 1,45 \quad (16.13)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,0439}{0,0445} = 0,987 \quad (16.14)$$

Poměrná uhlopříčná rozteč

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 1,45^2 + 0,987^2} = 1,22 \quad (16.15)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{1,45 - 1}{1,22 - 1} = 2 \quad (16.16)$$

Korekční součinitelé

$$C_z = 1$$

$$C_s = 0,275 * \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 * 2^{0,5} = 0,388 \quad (16.17)$$

16.3 Součinitel přestupu tepla sáláním

Teplota spalin jen v této oblasti nízká a lze sálavou složku zanedbat. Hodnota součinitele přestupu tepla sáláním je nízká a dosahuje pouze:

$$\alpha_{sal} = 0,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Pozn. Výpočet je analogický s předchozími kapitolami

16.3.1 Součinitel prostupu tepla k

Součinitel prostupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \alpha_k + \alpha_{sal} = 80,05 + 0,85 = 80,9 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (16.18)$$

Součinitel prostupu tepla k pro spalování plynu

$$k = \xi * \frac{\alpha_v * \alpha_s}{\alpha_v + \alpha_s} = 0,85 * \frac{80,9 * 56,75}{80,9 + 56,75} = 28,35 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (16.19)$$

Součinitel tepelné efektivity $\xi=0,85$

16.3.2 Tepelný výkon ohříváku vzduchu 2

Tepelný spád na ohříváku vzduchu 2

$$\Delta t = \psi \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = 0,93 * \frac{57 - 49,44}{\ln \frac{57}{49,44}} = 48,92 [^{\circ}\text{C}] \quad (16.20)$$

$$\Delta t_v = t_{spout} - t_{vzin} = 106 - 50 = 57 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_m = t_{spin} - t_{vzout} = 149,44 - 100 = 49,44 [^{\circ}\text{C}]$$

kde ψ je korekční součinitel pro křížový proud (určeno z diagramu [2])

Plocha ohříváku vzduchu 2

$$S_{vz} = \pi * D * l_{stř} * n_{tr} * z * x = \pi * 0,0445 * 3,2 * 38 * 20 * 2 = 680 [m] \quad (16.21)$$

Teplo předané do ohříváku vzduchu 2

$$Q_{vz}^{skut} = S_{vz} * \Delta t * k = 680 * 48,92 * 28,35 = 943,12 [kW] \quad (16.22)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{vz}^{odh} - Q_{vz}^{skut}}{Q_{vz}^{odh}} * 100 = \frac{942 - 943}{942} * 100 = -0,11 [\%] \quad (16.23)$$

Odchylka výkonu vyhovuje toleranci $\pm 2\%$.

17 Ohřívák vzduchu 1

Rozměry oblasti

Výška h:	1,6 [m]
Hloubka B:	2,16 [m]

Základní parametry ohříváku vzduchu

Vnější průměr trubky D	0,032	m
Vnitřní průměr trubky d	0,028	m
Tloušťka stěny tl.	0,004	m
Příčná rozteč S_1	0,072	m
Podélná rozteč S_2	0,093	m
Počet trubek n_{tr}	30	-
Počet řad z	2	-
Počet žebek na metr délky n_z	250	-
Výška žebra h_z	0,015	m
Tloušťka žebra tl_z	0,001	m
Střední délka trubky $l_{stř}$	1	m

Tabulka 40 Základní parametry ohříváku vzduchu 1

Základní parametry spalín a vzduchu

Parametry vody			Parametry vzduchu		
Vstupní entalpie	1184,9	<i>kJ</i>	Teplota na vstupu	20	$^{\circ}C$
Výstupní entalpie	1148,98	<i>kJ</i>	Teplota na výstupu	50	$^{\circ}C$
Teplota na vstupu	270,08	$^{\circ}C$	Tlak na vstupu	-	<i>MPa</i>
Teplota na výstupu	263,34	$^{\circ}C$	Tlak na výstupu	-	<i>MPa</i>

Tabulka 41 Parametry spalín a vzduchu pro ohřívák vzduchu 1

17.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Průtočný průřez pro vzduch

$$F_{vz} = B * h - (h * D * n_{tr} - 2 * h_z * t_z * h * n_z * n_{tr}) \quad (17.1)$$

$$F_{vz} = 2,16 * 1,8 - (1,6 * 0,032 * 30 - 2 * 0,015 * 0,001 * 1 * 250 * 30) = 2,28 \text{ [m}^2\text{]}$$

Objem vzduchu

$$V_{VZ} = O_{VZ} * M_{pv} * \left(\frac{t_{vzstř} + 273,15}{273,15} \right) = 10,16 * 1,39 * \left(\frac{35 + 273,15}{273,15} \right) = 15,95 \text{ [m}^3\text{]} \quad (17.2)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{VZ}}{F_{vz}} = \frac{15,95}{2,28} = 7 \text{ [m/s]} \quad (17.3)$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti λ :	0,02696 [W/mK]
Součinitel kinematické viskozity ν :	$16,7 * 10^{-6}$ [m ² /s]
Prandtlovo číslo Pr:	0,697 [-]

Součinitel přestupu tepla k pro žebrované trubky

$$\alpha_k = 0,23 * C_z * \varphi_\sigma * \frac{\lambda}{s_z} * \left(\frac{d}{s_z} \right)^{-0,54} * \left(\frac{h_z}{s_z} \right) * \left(\frac{w_{vz} * s_z}{\nu} \right) \quad (17.4)$$

$$\alpha_k = 0,23 * 0,93 * 0,59 * \frac{0,0269}{0,004} * \left(\frac{0,032}{0,004} \right)^{-0,54} * \left(\frac{0,015}{0,004} \right)^{-0,14} * \left(\frac{7 * 0,004}{16,7 * 10^{-6}} \right)^{0,65}$$

$$\alpha_k = 43,73 \text{ [W / m}^2\text{K]}$$

kde koeficient C_z se určí z grafu

Příčná a podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,072}{0,032} = 2,25 \quad (17.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,093}{0,032} = 2,90 \quad (17.6)$$

Podíl výhřevné plochy z vnější a vnitřní strany trubek

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{2}\right)^2 - 1 + 2 * \left(\frac{s_z}{D} - \frac{t_l}{D}\right)} \quad (17.7)$$

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{0,062}{0,032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,062}{0,032}\right)^2 - 1 + 2 * \left(\frac{0,004}{0,032} - \frac{0,001}{0,032}\right)} = 0,936$$

kde s_z je rozteč žeber

Součinitel β

$$\beta = \sqrt{\frac{2 * \psi_z * \alpha_k}{t_z * \lambda_z * (1 + \varepsilon * \psi_z * \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 * 0,85 * 43,73}{0,001 * 40 * (1 + 0,0045 * 0,85 * 43,73)}} \quad (17.8)$$

$$\beta = 38,6$$

kde $\psi_z = 0,85$ (určeno z grafu), $\lambda_z = 40$ W/mK (tepelná vodivost trubky, určeno z tabulky),
 $\varepsilon = 0,0045$ (součinitel zanesení)

Redukovaný součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{1r} = \left(\frac{S_z}{S} * E * \mu + \frac{S_h}{S}\right) * \frac{\psi_z * \alpha_k}{1 + \varepsilon * \psi_z * \alpha_k} \quad (17.9)$$

$$\alpha_{1r} = (0,936 * 0,86 + 0,064) * \frac{40 * 43,73}{1 + 0,0045 * 40 * 43,73} = 28,86 [W/m^2K]$$

kde $E=0,9$ (určeno z grafu závislost $\beta * h_z, D_z/D$), $\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S}$

17.2 Výpočet součinitele přestupu tepla k

Jelikož můžeme zanedbat součinitele přestupu tepla na straně vody, výpočet se pak zjednoduší:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}}} = \alpha_{1r} = 28,86 [W/m^2K] \quad (17.10)$$

17.2.1 Tepelný výkon ohříváku vzduchu 1

Teplotní spád na ohříváku vzduchu 1

$$\Delta t = \psi \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = 0,7 * \frac{243,34 - 220,08}{\ln \frac{243,34}{220,08}} = 162 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (17.11)$$

$$\Delta t_m = t_{vout} - t_{vzin} = 270,08 - 50 = 220,08 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_v = t_{vin} - t_{vzout} = 263,34 - 20 = 243,34 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

kde ψ je korekční součinitel pro křížový proud (určeno z diagramu [2])

Plocha ohříváku vzduchu 1

$$S_{vz} = S_{lm} * h * n_{tr} * z = 1,25 * 1,6 * 30 * 2 = 120,34 \text{ [m]} \quad (17.12)$$

$$S_{lm} = \pi * D * (1 - n_z * tl_z) + n_z * S_{lž} \quad (17.13)$$

$$S_{lm} = \pi * 0,032 * (1 - 250 * 0,001) + 30 * 0,0046 = 1,25 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_{lž} = \frac{2 * \pi * (D_z - D)^2}{4} + \pi * D_z * tl_z \quad (17.14)$$

$$S_{lž} = \frac{2 * \pi * (0,062 - 0,032)^2}{4} + \pi * 0,062 * 0,001 = 0,0046 \text{ [m}^2\text{]}$$

kde S_{lm} je plocha trubky na 1 metr délky, $S_{lž}$ je plocha 1 žebra

Teplo předané do ohříváku vzduchu 1

$$Q_{vz}^{skut} = S_{vz} * \Delta t * k = 120,34 * 162 * 28,86 = 563 \text{ [kW]} \quad (17.15)$$

Kontrola

$$\Delta = \frac{Q_{vz}^{odh} - Q_{vz}^{skut}}{Q_{vz}^{odh}} * 100 = \frac{565,2 - 563}{565,2} * 100 = 0,39 \text{ [%]} \quad (17.16)$$

Odchylka výkonu vyhovuje toleranci $\pm 2\%$.

18 Kontrola tepelné bilance

Nyní se provede součet veškerého předaného tepla na výhřevných plochách, teplo předané v ohřívacích vzduchu se nezapočítává. Jelikož je teplo pro ohřívák vzduchu započítáno ve výparníku je třeba tohle teplo odečíst.

$$\sum Q_{bi} = Q_{p2}^{skut} + Q_{p2}^{skut} + Q_{p1}^{skut} + Q_{eko2}^{skut} + Q_{eko1}^{skut} + Q_{vyp}^{celk} - I_{vz} = 47587 \text{ [kW]} \quad (18.1)$$

Tepelná bilance

$$\Delta Q = Q_i^{red} * \eta_k * M_{pv} - \sum Q_{bi} = 35870 * 0,9537 * 1,39 - 47587 = 23,79 \text{ [kW]} \quad (18.2)$$

Odchylka od tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_i^{red} * M_{pv}} * 100 = \frac{23,79}{35870 * 1,39} = 0,047 \text{ [%]} \quad (18.3)$$

Odchylka vyhovuje povolené toleranci $\pm 0,5\%$

19 Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh vertikálního kotle na spalování zemního plynu včetně dimenzování jednotlivých výhřevných ploch. Kotel je navržen na parní výkon 60 t/h, teplotu přehřáté páry 490 °C o tlaku 7 MPa. Jako palivo byl zvolen tranzitní zemní plyn.

Na začátku celého výpočtu byla provedena stechiometrie spalování, byl stanoven potřebný přívod vzduchu a množství spalin po spálení jednotkového množství paliva. Následně byla stanovena účinnost parního kotle ($\eta_k=95,37\%$), účinnost vycházela z odhadnuté teploty spalin na výstupu z kotle. Počáteční odhad spalin na výstupu byl zvolen dle rady konzultanta na teplotu 110 °C, skutečná teplota spalin je 105,9 °C (rozdíl je tedy 4,1 °C a vyhovuje toleranci).

V následujícím kroku výpočtu byly stanoveny rozměry spalovací komory, na základě vzorců co my byly poskytnuty konzultantem a uspořádáním hořáků ve spodní části spalovací komory. Dále byla určena teplota na konci spalovací komory ($t_o = 1288,7$ °C), která na požadavky emisí NO_x nesmí překročit teplotu 1300 °C, proto také neohříváme spalovací vzduch na vyšší teplotu než je 100 °C.

Před samotným dimenzováním a tepelným výpočtem jednotlivých výhřevných ploch, byla provedena základní bilance výhřevných ploch (Tab. 3). Jednotlivé entalpické spády byly odhadnuty na základě použité literatury.

Jako první teplosměnnou plochou je souproutý výměník přehřívák P2. Byl zvolen počet trubek aby rychlost páry byla v doporučeném rozmezí. Dále určíme součinitele přestupu tepla na straně spalin, součinitele přestupu tepla sáláním a součinitele přestupu tepla na straně pracovního média. Určíme součinitele prostupu tepla, teplotní spád a na základě základní bilance výhřevných ploch určíme plochu přehříváku. Tento postup je obdobný pro zbývající výhřevné plochy s tím rozdílem, že neuvažujeme součinitele přestupu tepla pracovního média u výparníku a ekonomizéru. Další výhřevnou plochou ve směru spalin je přehřívák P3. Tyto výhřevné plochy v prvním tahu kotle jsou zavěšeny na chladícím závěse, který je součástí přehříváku P1. Dále spaliny projdou přes mříž do druhého tahu kotle na přehřívák P1 a druhý díl ekonomizéru. První díl ekonomizéru a druhý díl ohříváku vzduchu jsou umístěny mimo samotný kotel ve spalinovém kanále. Také první stupeň ohřevu vzduchu je umístěn mimo kotel a vzduch je zde ohříván vodou z ekonomizéru. U každé výhřevné plochy byla provedena kontrola předaného tepla, která nesmí překročit $\pm 3\%$ od tepla předpokládaného. Stejně tak i byla provedena kontrola tepelné bilance celého kotle, která je v toleranci $\pm 0,5\%$. Ke zlepšení parametrů páry jsou mezi přehříváky P1 a P2, P2 a P3 vřazeny vstříky napájecí vody.

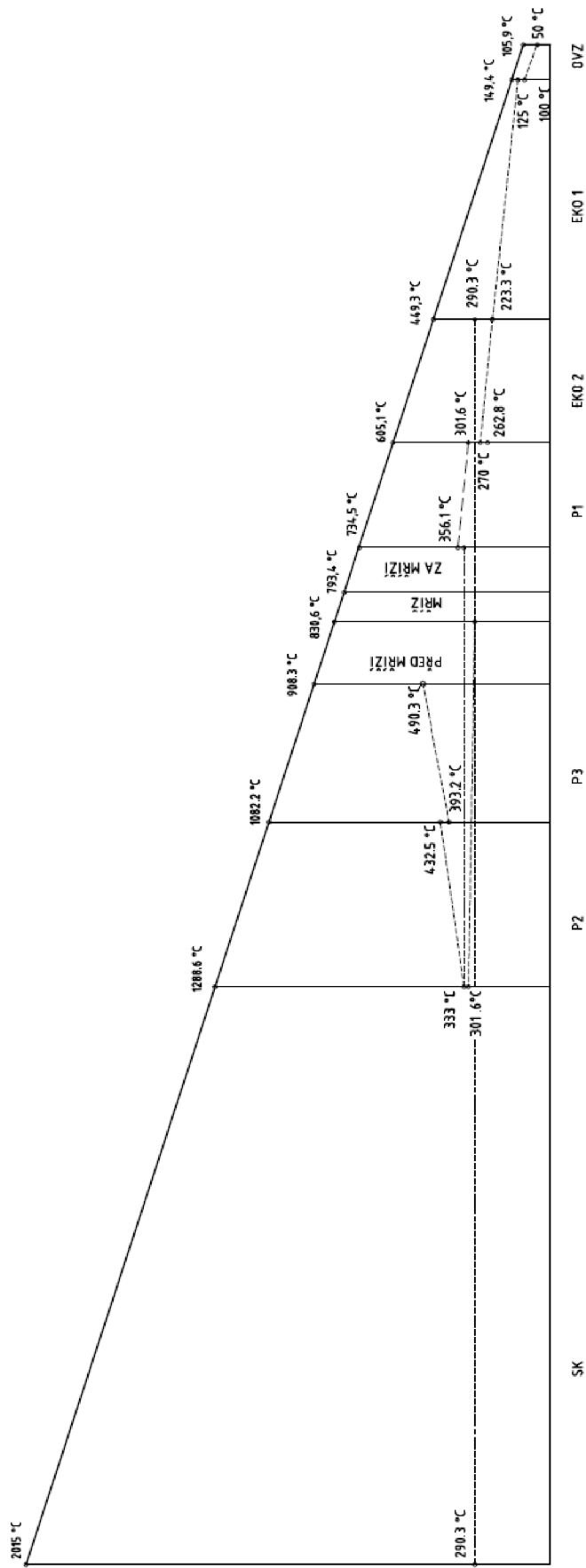
V závěru práce je uvedena tabulka se skutečnými parametry páry a pilový diagram. Výkresová dokumentace je v příloze diplomové práce, při jejíž tvorbě byla využita studentská verze softwaru [6].

Tabulka parametrů páry

Přehřívák 3					
T_{p3out}	490,34	°C	T_{p3in}	393,17	°C
P_{p3out}	7	MPa	P_{p3in}	7,15	MPa
\dot{i}_{p3out}	3387,76	kJ/kg	\dot{i}_{p3in}	3137,64	kJ/kg
Přehřívák 2					
T_{p2out}	432,5	°C	T_{p2in}	333	°C
P_{p2out}	7,15	MPa	P_{p2in}	7,3	MPa
\dot{i}_{p2out}	3218,29	kJ/kg	\dot{i}_{p2in}	2952,93	kJ/kg
Přehřívák 1					
T_{p1out}	356,12	°C	T_{p1in}	301,6	°C
P_{p1out}	7,3	MPa	P_{p1in}	7,45	MPa
\dot{i}_{p1out}	3027,86	kJ/kg	\dot{i}_{p1in}	2835,74	kJ/kg
Závěsné trubky					
T_{Zout}	301,6	°C	T_{Zin}	290,32	°C
P_{Zout}	7,45	MPa	P_{Zin}	7,45	MPa
I_{Zout}	2835,74	kJ/kg	I_{Zin}	2767,8	kJ/kg
Výparník					
T_{Vypout}	290,32	°C	T_{Vypin}	262,81	°C
P_{Vypout}	7,45	MPa	P_{Vypin}	7,45	MPa
I_{Vypout}	2767,8	kJ/kg	I_{Vypin}	1148,98	kJ/kg
Ekonomizér					
T_{Ekoout}	269,96	°C	T_{Ekooin}	125	°C
P_{Ekoout}	7,45	MPa	P_{Ekooin}	7,65	MPa
I_{Ekoout}	1184,25	kJ/kg	I_{Ekooin}	530,2	kJ/kg

Tabulka 42 Parametry páry

Pilový diagram



Obrázek 8 Pilový diagram

20 Seznam použité literatury

- [1] BUDAJ, Florián. *Parní kotle - Podklady pro tepelný výpočet*. VUT Brno, 1979, 288 s.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 176 s. ISBN 80-010-2035-5.
- [3] Microsoft Office Excel 2003
- [4] Steam Property
- [5] FÍK, Josef, Základní fyzikální vlastnosti ZP (I). *Tzb-info* [online]. 2004 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1921-zakladni-fyzikalni-vlastnosti-zp-i>
- [6] AutoCad 2014 – studentská verze
- [7] KŘIVÁNEK, R. Navrhněte parní kotel na spalování zemního plynu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 129 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

21 Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

Obrázek 1 I-t diagram spalin.....	20
Obrázek 2 schéma přehříváku P2	36
Obrázek 3 schéma přehříváku P3	50
Obrázek 4 schéma přehříváku P1	82
Obrázek 5 schéma ekonomizéru 2.....	97
Obrázek 6 schéma ekonomizéru 1.....	111
Obrázek 7 schéma ohříváku vzduchu 2	117
Obrázek 8 Pilový diagram.....	129

Tabulky

Tabulka 1 Parametry zemního plynu [5].....	14
Tabulka 2 Entalpie spalin při spálení 1Nm ³ plynu.....	19
Tabulka 3 Základní bilance výhřevných ploch.....	29
Tabulka 4 Základní parametry přehříváku P2	36
Tabulka 5 Parametry spalin a přehřáté páry přehříváku P2.....	36
Tabulka 6 Základní parametry membránové stěny	43
Tabulka 7 Základní parametry spalin a vody	43
Tabulka 8 Základní parametry závěsných trubek	46
Tabulka 9 Základní parametry spalin a přehřáté páry.....	46
Tabulka 10 Základní parametry přehříváku P3	50
Tabulka 11 Parametry spalin a přehřáté páry přehříváku P3.....	50
Tabulka 12 Základní parametry membránové stěny	56
Tabulka 13 Základní parametry spalin a vody	56
Tabulka 14 Základní parametry závěsných trubek	59
Tabulka 15 Základní parametry spalin a přehřáté páry	59
Tabulka 16 Základní parametry závěsných trubek	63
Tabulka 17 Základní parametry spalin a přehřáté páry	63
Tabulka 18 Základní parametry membránové stěny	69
Tabulka 19 Základní parametry spalin a vody	69
Tabulka 20 Základní parametry mříže.....	72
Tabulka 21 Základní parametry spalin a vody	72
Tabulka 22 Základní parametry membránové stěny	77
Tabulka 23 Základní parametry spalin a vody	77
Tabulka 24 Základní parametry přehříváku P1	82
Tabulka 25 Parametry spalin a přehřáté páry přehříváku P1.....	82
Tabulka 26 Základní parametry membránové stěny	89
Tabulka 27 Základní parametry spalin a vody	89
Tabulka 28 Základní parametry membránové stěny	92
Tabulka 29 Základní parametry spalin a vody	92
Tabulka 30 Základní parametry Ekonomizéru 2	97
Tabulka 31 Parametry spalin a přehřáté páry Ekonomizéru 2.....	97
Tabulka 32 Základní parametry membránové stěny	103
Tabulka 33 Základní parametry spalin a vody	103
Tabulka 34 Základní parametry membránové stěny	106
Tabulka 35 Základní parametry spalin a vody	106
Tabulka 36 Základní parametry Ekonomizéru 1	111
Tabulka 37 Parametry spalin a přehřáté páry Ekonomizéru 1.....	111
Tabulka 38 Základní parametry ohříváku vzduchu 2	117
Tabulka 39 Parametry spalin a vzduchu pro ohřívák vzduchu 2	117
Tabulka 40 Základní parametry ohříváku vzduchu 1	122
Tabulka 41 Parametry spalin a vzduchu pro ohřívák vzduchu 1	122
Tabulka 42 Parametry páry.....	128

22 Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
a		stupeň černosti proudu spalin
A,B,h	m	Rozměry spalinového kanálu
a _{1r}	W/m ² K	redukovaný součinitel přestupu tepla
a _{ns}		stupeň černosti nesvítivé části plamene
a _o		stupeň černosti ohniště
a _{pl}		stupeň černosti plamene
a _{sv}		stupeň černosti svítivé části plamene
Bo		Boltzmanovo číslo
C _l		opravný koeficient na poměrnou délku
C _m		opravný koeficient mezikruží
C ^r /H ^r		podíl uhlíku a vodíku v původním vzorku paliva
C _s		korekční součinitel na uspořádání svazku
C _t		opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny
C _z		korekční součinitel na počet řad
D	m	vnější průměr trubky
d	m	vnitřní průměr trubky
d _e	m	ekvivalentní průměr
E		součinitel efektivity žebra
f		součinitel vlhkosti paliva
F	m ²	povrch stěn ohniště
F _p	m ²	průtočný průřez pro páru
F _{sp}	m ²	průtočný průřez pro spaliny
F _{ús}	m ²	účinná sálavá plocha stěn ohniště
F _{vz}	m ²	průtočný průřez pro vzduch
h _ž	m	výška žebra
i _{nv}	kJ/kg	entalpie napájecí vody
l _o		entalpie spalin na konci spalovací komory
i _{pp}	kJ/kg	entalpie přehřáté páry
l _{sp}	kJ/m ³	entalpie spalin
l _u	kJ/m ³	entalpie nechlazeného plamene
l _{vz}	kJ/m ³	entalpie vzduchu
i _{xin}	kJ/kg	entalpie páry na vstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
i _{xout}	kJ/kg	entalpie páry na výstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
k	W/m ² K	součinitel prostupu tepla
k*p*s		optická hustota spalin
k _{ns}	1/m*MPa	součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny
k _s *r _s	1/m*MPa	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
k _{sv}		součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
l _{stř}	m	střední délka hada
M		střední zdánlivá molová hmotnost

M		součinitel průběhu teploty v ohništi
m		součinitel zaplnění ohniště svítivým plamenem
M_{pp}	kg/s	průtok páry
M_{pv}	m^3/s	množství přiváděného paliva
n_{tr}		počet trubek
$n_{\bar{z}}$		počet žeber na metr délky
O	m	obvod průřezu kanálu
O_{sp}	m^3/m^3	objem vlhkých spalin
O_{sp}^*C	kJ/m^3K	střední celkové měrné teplo spalin
O_{spmin}	m^3/m^3	minimální objem vlhkých spalin
$O_{spstř}$	m^3	objem spalin pro střední teplotu
O_{sp}^s	m^3/m^3	objem suchých spalin
O_{spmin}^s	m^3/m^3	minimální objem suchých spalin
O_{vZmin}^s	m^3/m^3	minimální objem suchého vzduchu
O_{vZmin}^v	m^3/m^3	minimální objem vlhkého vzduchu
OVZ	m^3/m^3	skutečné množství spalovacího vzduchu
Pr		Prandtlovo číslo
p_{sp}	MPa	celkový parciální tlak tříatomových plynů
$p_{stř}$	MPa	střední tlak páry
P_{xin}	MPa	tlak páry na vstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
P_{xout}	MPa	tlak páry na výstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
Q_i^r	kJ/m^3	výhřevnost paliva
Q_{ired}	kJ/m^3	redukováná výhřevnost
q_s	kW/m^3	průřezové zatížení ohniště
Q_v	kW	výrobní množství páry
q_v	kW/m^3	objemové zatížení ohniště
Q_{vypSk}	kW	teplo přijaté výparníkem v ohništi
Q_x	kW	tepelný výkon přejatý výhřevnou plochou x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
Q_x^{skut}	kW	skutečný tepelný výkon výměníku x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
r		měrná plynová konstanta
r_{CO2}		objemová část oxidu uhličitého
r_{H2O}		objemová část vodní páry
r_{sp}		objemová část tříatomových plynů
S		účinná tloušťka sálavé vrstvy spalin
S_1	m	příčná rozteč
S_{1m}	m^2	plocha 1 metru žebrované trubky
$S_{1\bar{z}}$	m^2	plocha žebra
S_2	m	podélná rozteč
S_x	m^2	skutečná plocha výměníku x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
$S_{\bar{z}}$	m	rozteč žeber
tl.	m	tloušťka stěny
$tl_{\bar{z}}$	m	tloušťka žebra
t_{np}	$^{\circ}C$	teplota nechlazeného plamene
t_o		teplota na konci spalovací komory

T_o		absolutní teplota na konci ohniště
$t_{ppstř}$	$^{\circ}C$	střední teplota páry
T_s	$^{\circ}C$	absolutní teplota spalin pro střední hodnotu
t_{spin}	$^{\circ}C$	vstupní teplota spalin
t_{spout}	$^{\circ}C$	výstupní teplota spalin
$t_{spstř}$	$^{\circ}C$	střední teplota spalin
t_{vz}	$^{\circ}C$	střední teplota vzduchu
t_{vzin}	$^{\circ}C$	teplota vzduchu na vstupu
t_{vzout}	$^{\circ}C$	teplota vzduchu na výstupu
T_{xin}	$^{\circ}C$	teplota páry na vstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
T_{xout}	$^{\circ}C$	teplota páry na výstupu x (x= p3,p2,p1,Z,Vyp,Eko)
T_z	$^{\circ}C$	absolutní teplota povrchu nánosů
V_o	m^3	objem spalovací komory
$v_{stř}$	m^3/kg	střední měrný objem páry
w_{sp}	m/s	rychlost spalin
w_{vz}	m/s	rychlost vzduchu
x		počet hadů
z		počet řad
Z_{co}		ztráta chemickým nedopalem
Z_k		komínová ztráta
Z_{sv}		ztráta sáláním a zdílením tepla do okolí
α		součinitel přebytku vzduchu
α_k	W/m^2K	součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin
α_p	W/m^2K	součinitel přestupu tepla na straně páry
α_s	W/m^2K	celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin
α_{sal}	W/m^2K	součinitel přestupu tepla sáláním
α_{st}		stupeň černosti povrchu stěn
α_v	W/m^2K	součinitel přestupu tepla na straně vzduchu
Δ		odchylka
Δi	kJ/kg	entalpický spád
Δp	MPa	tlaková ztráta
Δt	$^{\circ}C$	tepelný spád výhřevné plochy
ε		součinitel zanesení
η_k	$\%$	účinnost kotle
λ	W/mK	součinitel tepelné vodivosti
λ_z	W/m^*K	tepelná vodivost žebra
ν	m^2/s	součinitel kinematické viskozity
ξ		součinitel využití ohříváku vzduchu
ρ_{sp}	kg/Nm^3	hustota spalin
σ_1		poměrná příčná rozteč
σ_2		poměrná podélná rozteč
σ'_2		poměrná uhlopříčná rozteč
φ		součinitel uchování tepla
φ_{σ}		parametr určující uspořádání trubek svazku
ψ		součinitel tepelné efektivity

23 Seznam příloh

Příloha č. 1 : Výkres parního kotle