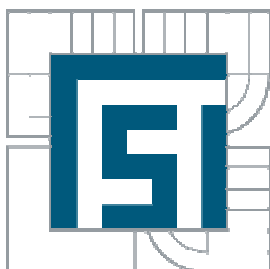


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NAVRHNĚTE PARNÍ KOTEL NA SPALOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU

STEAM BOILER FOR NATURAL GAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ROBIN KŘIVÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. ZDENĚK SKÁLA, CSC.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Robin Křivánek

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:

Navrhňte parní kotel na spalování zemního plynu

v anglickém jazyce:

Steam boiler for natural gas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh parního kotle, řazení teplosměnných ploch;

parametry kotle:

výkon 80t/h, tlak přehřáté páry 9,32 MPa, teplota přehřáté páry 510°C, teplota napájecí vody 142°C;

Napájecí voda není dle ČSN EN 12952-12, nemůže být použita pro chlazení přehřáté páry

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

Cíle diplomové práce:

Navrhnout parní kotel na spalování zemního plynu ve vertikálním uspořádání výhřevných ploch, dále navrhnete způsob regulace teploty přehřáté páry.

Navrhnete řazené výhřevných ploch a jejich velikost.

Seznam odborné literatury:

Černý ,Janeba, Teysler: Parní kotle ,technický průvodce, SNTL Praha 1992;
Budaj,F.: Parním kotle,„podklady pro tepelný výpočet,skriptum VUT v Brně.
Basu,Kefa,Jestin: Boilers and Burners, Desing and Theory,Spinger 2000

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem parního kotle na spalování zemního plynu o parním výkonu 80t/hod. V první fázi je proveden výpočet stechiometrického množství spalovacího vzduchu a spalin. Pak následuje konstrukční návrh spalovací komory. Poté se pokračuje výpočtem jednotlivých výhřevných ploch kotle. Na závěr je práce zaměřena na způsob provedení vstříků. Ke kontrole správnosti výsledků je provedena tepelná bilance celého kotle.

Klíčová slova:

Kotel, zemní plyn, pára, přehřívák, membránová stěna, teplota

Abstract

This diploma thesis describes the design of steam boiler for combustion natural gas, which has a steam power 80t/hour. In the first phase is performed calculation of stoichiometric amount of combustion air and flue gas. After that follows constructional proposal of the combustion chamber. Furthermore continue by calculation heating surfaces of the boiler. In conclusion, the thesis is focused on designing the injections. To check the accuracy of the results is recalculated heat balance the whole boiler.

Keywords:

Boiler, natural gas, steam, superheater, membrane wall, temperature

Citace

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..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrhu parního kotle na spalování zemního plynu vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doc. Ing. Zdeňka Skály, Csc. a konzultanta Ing. Pavla Křemínského a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňku Skálovi, Csc. a panu Ing. Pavlu Křemínskému za spolupráci a cenné rady při tvorbě této práce. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat rodině a blízkým za bezmeznou podporu během celého studia.

Obsah

OBSAH	- 9 -
1 ÚVOD	- 13 -
2. STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY	- 14 -
2.1 SPALINY.....	- 15 -
2.2 SPALINY (A = 1,05)	- 16 -
2.3 VÝPOČET ROSNÉHO BODU SPALIN	- 18 -
2.4 ZTRÁTY KOTLE	- 19 -
2.4.1 <i>Mechanický nedopal</i>	- 19 -
2.4.2 <i>Chemický nedopal</i>	- 19 -
2.4.3 <i>Ztráty sdílením tepla do okolí</i>	- 19 -
2.4.4 <i>Komínová ztráta</i>	- 19 -
2.4.5 <i>Účinnost kotle</i>	- 20 -
3 VÝKON KOTLE	- 21 -
3.1 TEPLA PŘIVEZENÉ DO KOTLE	- 21 -
3.2 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY	- 21 -
3.3 MNOŽSTVÍ PALIVA	- 21 -
4 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY	- 22 -
4.1 OBJEM OHNIŠTĚ	- 22 -
4.2 SOUČINITEL M	- 22 -
4.3 BOTZMANOVO ČÍSLO.....	- 23 -
4.4 STUPEŇ ČERNOSTI OHNIŠTĚ	- 23 -
4.5 TEPLOTA SPALIN NA VÝSTUPU Z OHNIŠTĚ	- 25 -
5 NÁVRH VÝHŘEVNÝCH PLOCH	- 26 -
5.1 TLAKOVÉ ZTRÁTY	- 26 -
5.2 PŘEHŘÍVÁK P3	- 26 -
5.3 PŘEHŘÍVÁK P2	- 27 -
5.4 PŘEHŘÍVÁK P1	- 28 -
5.5 ZÁVĚSNÉ TRUBKY	- 29 -
5.6 VÝPARNÍK	- 29 -
5.7 EKONOMIZÉR.....	- 30 -
5.8 EKONOMIZÉR 2	- 31 -
5.9 EKONOMIZÉR 1	- 31 -
5.10 CELKOVÉ PŘIJATÉ TEPLA MÉDIEM.....	- 32 -
6 OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P2	- 34 -
6.1 PŘEHŘÍVÁK P2	- 34 -
6.1.1 <i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry</i>	- 35 -
6.1.2 <i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	- 36 -
6.1.3 <i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin</i>	- 38 -
6.1.4 <i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku</i>	- 39 -
6.2 MEMBRÁNOVÁ STĚNA	- 40 -
6.2.1 <i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	- 40 -
6.2.2 <i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin</i>	- 41 -
6.2.3 <i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny</i>	- 41 -
6.3 ZÁVĚSNÉ TRUBKY.....	- 42 -
6.3.1 <i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry</i>	- 42 -
6.3.2 <i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	- 44 -

6.3.3	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....	- 44 -
6.3.4	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek	- 44 -
6.4	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI P2.....	- 45 -
7	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P3.....	- 46 -
7.1	PŘEHŘÍVÁK P3	- 46 -
7.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	- 47 -
7.1.2	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 48 -
7.1.3	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 50 -
7.1.4	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku.....	- 51 -
7.2	MEMBRÁNOVÁ STĚNA	- 52 -
7.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 52 -
7.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 53 -
7.2.3	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny.....	- 53 -
7.3	ZÁVĚSNÉ TRUBKY	- 54 -
7.3.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	- 55 -
7.3.2	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 55 -
7.3.3	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 55 -
7.3.4	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek	- 55 -
7.4	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI P3.....	- 56 -
8	OBLAST PŘED MŘÍŽÍ.....	- 57 -
8.1	ZÁVĚSNÉ TRUBKY	- 57 -
8.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....	- 57 -
8.1.2	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 58 -
8.1.3	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 59 -
8.1.4	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek	- 60 -
8.2	MEMBRÁNOVÁ STĚNA	- 61 -
8.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 61 -
8.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 62 -
8.2.3	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny.....	- 62 -
8.3	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI PŘED MŘÍŽÍ.....	- 63 -
9	OBLAST MŘÍŽE	- 64 -
9.1	MEMBRÁNOVÁ MŘÍŽ	- 64 -
9.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 65 -
9.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 66 -
9.1.3	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny	- 68 -
9.2	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI MŘÍŽE.....	- 68 -
10	OBLAST ZA MŘÍŽÍ	- 69 -
10.1	MEMBRÁNOVÁ STĚNA.....	- 69 -
10.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	- 69 -
10.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 71 -
10.1.3	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny	- 72 -
10.2	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI ZA MŘÍŽÍ	- 73 -
11	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P1.....	- 74 -
11.1	PŘEHŘÍVÁK P1.....	- 74 -
11.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	- 75 -
11.1.2	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 76 -
11.1.3	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 78 -
11.1.4	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku	- 79 -
11.2	MEMBRÁNOVÁ STĚNA.....	- 80 -
11.2.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	- 80 -
11.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	- 81 -
11.2.3	Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny	- 81 -

11.3	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI P1	- 82 -
12	OBLAST EKONOMIZÉRU 2	- 83 -
12.1	EKONOMIZÉR 2	- 83 -
12.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	<i>- 84 -</i>
12.1.2	<i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>- 86 -</i>
12.1.3	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ekonomizéru</i>	<i>- 87 -</i>
12.2	MEMBRÁNOVÁ STĚNA	- 88 -
12.2.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	<i>- 89 -</i>
12.2.2	<i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>- 89 -</i>
12.2.3	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny.....</i>	<i>- 90 -</i>
12.3	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI EKONOMIZÉRU 2	- 90 -
13	OBLAST VÝSTUPU Z KOTLE	- 92 -
13.1	MEMBRÁNOVÁ STĚNA	- 92 -
13.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	<i>- 92 -</i>
13.1.2	<i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>- 94 -</i>
13.1.3	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny.....</i>	<i>- 95 -</i>
13.2	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI VÝSTUPU Z KOTLE	- 95 -
14	OBLAST EKONOMIZÉRU 1.....	- 97 -
14.1	EKONOMIZÉR 1	- 97 -
14.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	<i>- 99 -</i>
14.1.2	<i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>- 100 -</i>
14.1.3	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ekonomizéru</i>	<i>- 101 -</i>
14.2	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI EKONOMIZÉRU 1	- 102 -
15	OBLAST OHŘÍVÁKU VZDUCHU	- 104 -
15.1	OHŘÍVÁK VZDUCHU	- 104 -
15.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu.....</i>	<i>- 105 -</i>
15.1.2	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	<i>- 106 -</i>
15.1.3	<i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>- 108 -</i>
15.1.4	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ohříváku.....</i>	<i>- 109 -</i>
15.2	TEPELNÁ BILANCE V OBLASTI OHŘÍVÁKU VZDUCHU	- 110 -
16	VSTŘÍK I.....	- 111 -
16.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....</i>	<i>- 112 -</i>
16.1.2	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon vstříku I</i>	<i>- 113 -</i>
17	VSTŘÍK II.....	- 115 -
17.1.1	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry.....</i>	<i>- 116 -</i>
17.1.2	<i>Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon vstříku II</i>	<i>- 117 -</i>
18	KONTROLA TEPELNÉ BILANCE.....	- 119 -
19	ZÁVĚR.....	- 120 -
20	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 121 -
21	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	- 122 -
22	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	- 123 -
23	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 129 -

1 Úvod

Úkolem diplomové práce je vypracovat tepelný výpočet parního kotle. Navrhovaný kotel je přetlakový a skládá se ze dvou tahů s přirozenou cirkulací pracovního média ve výparníku. Jako zásobník pracovní látky pro kotel slouží buben. Plyn je spalován prostřednictvím dvou vertikálních hořáků situovaných ve spodní části spalovací komory.

Hlavní výhřevné plochy ve směru proudění spalin jsou přehříváky P2 a P3, dále spaliny prochází do druhého tahu mříží a otáčí směrem dolů na přehřívák P1. Před opuštěním spalin z kotle se ochladí o ekonomizér 2. Již mimo tělo samotného kotle pokrčují spaliny na ekonomizér 1. Pro zvýšení účinnosti je zde zavedena dodatková plocha a to ohřívák vzduchu, poté následuje odchod spalin do komína. K regulaci výstupní teploty páry je slouží 2 vstříky, které jsou umístěny v těle bubnu v podobě dvou teplosměnných výměníků, které zajistí požadované množství a parametry výstupní páry.

Při výpočtech jsem postupoval podle [1], pokud není uvedeno. A dále k samotným matematickým úkonům a k určování stavových veličin médií jsem využíval [4] a jeho nadstavbu [5].

2. Stechiometrické výpočty

Palivem pro navrhovaný kotel je tranzitní (ruský) plyn a zde jsou vypsány jeho parametry podle [3]

Výhřevnost	Q_i^r	35,87	MJ/Nm ³
Metan	CH ₄	98,39	%
Etan	C ₂ H ₆	0,44	%
Propan	C ₃ H ₈	0,12	%
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		100,00	%

Tab. 1 Složení a výhřevnost tranzitního plynu

Minimální množství kyslíku při spalování 1 m³ suchého plynu

$$O_{O_2min} = 0,5 \cdot \frac{CO + H_2}{100} + 1,5 \cdot \frac{H_2S}{100} + \sum \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{C_xH_y}{100} - \frac{O_2}{100} \quad (2.1)$$

$$O_{O_2min} = 0,5 \cdot \frac{0,07 + 0}{100} + 1,5 \cdot \frac{0}{100} + \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{98,39}{100} + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{0,44}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0,16}{100} + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0,07}{100} + \left(5 + \frac{12}{4} \right) \cdot \frac{0,03}{100} - \frac{0}{100}$$

$$O_{O_2min} = 0,0035 + 0 + 1,9678 + 0,0154 + 0,008 + 0,00455 + 0,0024 - 0$$

$$O_{O_2min} = 1,9982 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Minimální množství suchého vzduchu na spálení 1 m³ plynu

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min} = \frac{100}{21} \cdot 1,9982 = 9,5150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.2)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu na spálení 1 m³ plynu

$$O_{VZmin} = f \cdot O_{VZmin}^S = 1,0167 \cdot 9,515 = 9,6739 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.3)$$

Součinitel f

$$f = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} = 1 + 0,7 \cdot \frac{2337}{99712 - 0,7 \cdot 2337} = 1,0167 \quad (2.4)$$

$$\frac{p''}{p_c - p''} = 0,024 \quad (2.5)$$

$$p'' = 2337 \text{ Pa}$$

$$p_c = 99712 \text{ Pa}$$

φ je relativní vlhkost vzduchu (70%)

p'' je absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu

p_c je celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$O_{H_2O} = O_{VZmin} - O_{VZmin}^l = (f - 1) \cdot O_{VZmin}^s = (1,0167 - 1) \cdot 9,515 \quad (2.6)$$

$$O_{H_2O} = 0,1587 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

2.1 Spaliny

Jednotlivé složky min. množství vlhkých spalin vzniklé spálením suchého plynu ($\alpha = 1$)

$$O_{CO_2}^s = \left(CO + CO_2 + \sum x \cdot C_xH_y + 0,03 \cdot O_{VZmin}^s \right) \cdot 0,01 \quad (2.7)$$

$$O_{CO_2}^s = 0,01 \cdot [0 + 0,07 + (1 \cdot 98,39 + 2 \cdot 0,44 + 3 \cdot 0,16 + 4 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,03) + 0,03 \cdot 9,515]$$

$$O_{CO_2}^s = 0,01 \cdot [0 + 0,07 + (1 \cdot 98,39 + 2 \cdot 0,44 + 3 \cdot 0,16 + 4 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,03) + 0,03 \cdot 9,515]$$

$$O_{CO_2}^s = 1,00535 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$O_{SO_2}^s = 0,01 \cdot H_2S = 0,01 \cdot 0 = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.8)$$

$$O_{N_2}^s = 0,01 \cdot (N + 78,05 \cdot O_{VZmin}^s) = 0,01 \cdot (0,84 + 78,05 \cdot 9,515) \quad (2.9)$$

$$O_{N_2}^s = 7,4349 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$O_{Ar}^s = 0,0092 \cdot O_{VZmin}^s = 0,0092 \cdot 9,515 = 0,0875 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.10)$$

Objem suchých spalin

$$O_{SPmin}^s = O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s + O_{N_2}^s + O_{Ar}^s = 1,00535 + 0 + 7,4349 + 0,0875 \quad (2.11)$$

$$O_{SPmin}^s = 8,5277 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2Omin} = 0,01 \cdot \left(\sum \frac{y}{2} \cdot C_xH_y + H_2 + H_2S \right) + O_{H_2O}^v \quad (2.12)$$

$$O_{H_2Omin} = 0,01 \cdot \left(\frac{4}{2} \cdot CH_4 + \frac{6}{2} \cdot C_2H_6 + \frac{8}{3} \cdot C_3H_8 + \frac{10}{4} \cdot C_4H_{10} + \frac{12}{5} \cdot C_5H_{12} + C + O \right) + 0,1587$$

$$O_{H_2Omin} = 0,01 \cdot (2 \cdot 98,39 + 3 \cdot 0,44 + 4 \cdot 0,16 + 5 \cdot 0,07 + 6 \cdot 0,03 + 0 + 0) + 0,1587$$

$$O_{H_2Omin} = 2,1514 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Stechiometrické množství vlhkosti z paliva

$$O_{H_2O}^{SP} = O_{H_2Omin} - O_{H_2O}^V = 2,1514 - 0,1587 = 1,9927 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.12)$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SPmin} = O_{SPmin}^S + O_{H_2Omin} = 8,5277 + 2,1514 = 10,6792 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.13)$$

Hustota při minimálním množství spalin

$$\rho_{SPmin} = \frac{\sum O_i^S \cdot \rho_i}{O_{SPmin}} = \frac{O_{CO_2}^S \cdot \rho_{CO_2} + O_{N_2}^S \cdot \rho_{N_2} + O_{Ar}^S \cdot \rho_{Ar} + O_{H_2Omin} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{SPmin}} \quad (2.14)$$

$$\rho_{SPmin} = \frac{1,00535 \cdot 1,977 + 7,4349 \cdot 1,251 + 0,0875 \cdot 1,784 + 2,1514 \cdot 0,804}{10,6792}$$

$$\rho_{SPmin} = 1,2333 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

2.2 Spaliny ($\alpha = 1,05$)

Objem kyslíku ve spalinách s přebytkem $\alpha = 1,05$ při spálení 1 m³ plynu

$$O_{O_2} = 0 + (1,05 - 1) \cdot O_{VZmin}^S \cdot 0,21 = 0 + (0,05) \cdot 9,515 \cdot 0,21 \quad (2.15)$$

$$O_{O_2} = 0,0999 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem vodní páry ve spalinách s přebytkem $\alpha = 1,05$ při spálení 1 m³ plynu

$$O_{H_2O} = O_{H_2Omin} + (1,05 - 1) \cdot O_{VZmin}^S \cdot O_{H_2O}^V \quad (2.16)$$

$$O_{H_2O} = 2,1514 + (0,05) \cdot 0,1587$$

$$O_{H_2O} = 2,1593 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem dusíku ve spalinách s přebytkem $\alpha = 1,05$ při spálení 1 Nm³ plynu

$$O_{N_2} = O_{N_2}^S + (1,05 - 1) \cdot O_{VZmin}^S \cdot 0,7805 = 7,4349 + (0,05) \cdot 9,515 \cdot 0,7805 \quad (2.17)$$

$$O_{N_2} = 7,8062 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem oxidu uhličitého ve spalinách s přebytkem $\alpha = 1,05$ při spálení 1 m³ plynu

$$O_{CO_2} = O_{CO_2}^S + (1,05 - 1) \cdot O_{VZmin}^S \cdot 0,0003 = 1,0054 + (0,05) \cdot 9,515 \cdot 0,003 \quad (2.18)$$

$$O_{CO_2} = 1,0055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem argonu ve spalinách s přebytkem $\alpha = 1,05$ při spálení 1 m³ plynu

$$O_{Ar} = O_{Ar}^S + (1,05 - 1) \cdot O_{VZmin}^S \cdot 0,0092 = 0,0875 + (0,05) \cdot 9,515 \cdot 0,0092 \quad (2.19)$$

$$O_{Ar} = 0,0919 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Celkový objem suchých spalin

$$O_{SP}^S = \sum O_i = O_{O_2} + O_{N_2} + O_{CO_2} + O_{Ar} = 0,0999 + 7,8062 + 0,0999 + 0,0919 \quad (2.20)$$

$$O_{SP}^S = 9,0035 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečný objem vlhkých spalin

$$O_{SP}^V = O_{SP}^S + O_{H_2O} = 9,0035 + 2,1593 = 11,1628 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.21)$$

Skutečný objem vzduchu

$$O_{VZ} = \alpha \cdot O_{VZmin} = 1,05 \cdot 9,6739 = 10,1628 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.22)$$

Hustota při minimálním množství spalin

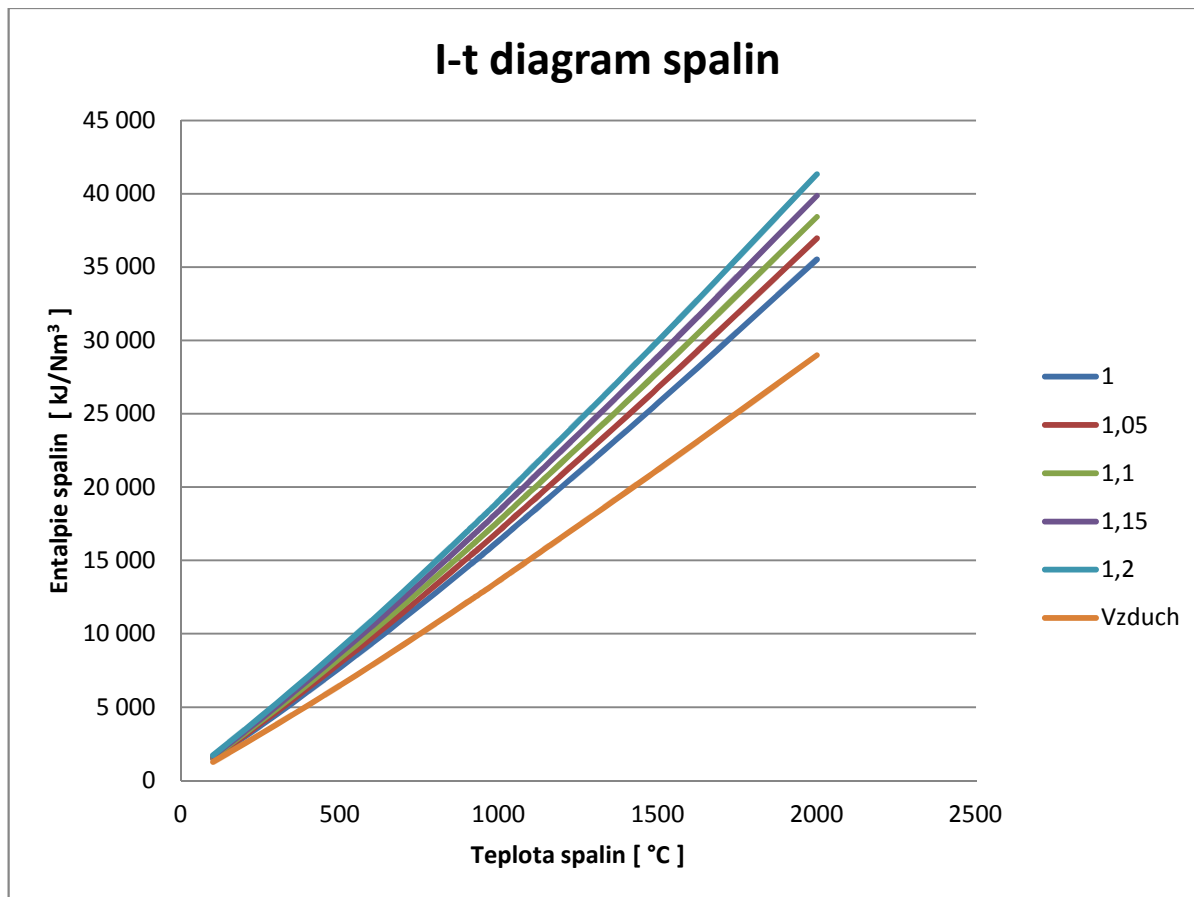
$$\rho_{SP} = \frac{\sum O_i \cdot \rho_i}{O_{SP}^S} = \frac{O_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + O_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + O_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + O_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + O_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{SP}^S} \quad (2.23)$$

$$\rho_{SP} = \frac{0,01 \cdot 1,429 + 1,0055 \cdot 1,977 + 7,8062 \cdot 1,251 + 0,092 \cdot 1,784 + 2,227 \cdot 0,804}{11,2304}$$

$$\rho_{SP} = 1,2329 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

t [°C]	Isp [kJ/Nm3]	Ivz [kJ/Nm3]	1	1,05	1,1	1,15	1,2
100	1468,3	1282,7	1468,3	1532,4	1596,6	1660,7	1724,8
200	2962,3	2581,2	2962,3	3091,3	3220,4	3349,5	3478,5
300	4496,9	3903,2	4496,9	4692,1	4887,2	5082,4	5277,5
400	6073,6	5253,6	6073,6	6336,3	6599,0	6861,7	7124,4
500	7701,2	6635,3	7701,2	8033,0	8364,8	8696,5	9028,3
600	9342,7	8047,4	9342,7	9745,0	10147,4	10549,8	10952,1
700	11046,9	9489,0	11046,9	11521,4	11995,8	12470,3	12944,7
800	12782,9	10954,3	12782,9	13330,6	13878,3	14426,0	14973,7
900	14552,6	12449,9	14552,6	15175,1	15797,6	16420,1	17042,6
1000	16353,2	13965,5	16353,2	17051,5	17749,8	18448,1	19146,3
1100	18181,3	15501,0	18181,3	18956,4	19731,4	20506,5	21281,5
1200	20039,3	17046,7	20039,3	20891,6	21743,9	22596,3	23448,6
1300	21917,3	18602,7	21917,3	22847,4	23777,6	24707,7	25637,8
1400	23812,2	20168,8	23812,2	24820,7	25829,1	26837,5	27846,0
1500	25726,4	21754,6	25726,4	26814,1	27901,8	28989,6	30077,3
1600	27671,8	23341,0	27671,8	28838,9	30005,9	31172,9	32340,0
1800	31570,4	26543,8	31570,4	32897,6	34224,8	35552,0	36879,2
2000	35521,1	29786,4	35521,1	37010,4	38499,8	39989,1	41478,4

Tab. 2 Entalpie vzduchu a spalin pro různé hodnoty přebytku vzduchu



Obr. 2-1 I-t diagram vlhkých spalin

2.3 Výpočet rosného bodu spalin

Protože palivo neobsahuje síru, tak teplota rosného bodu je dána sytostí vodní páry.

Střední zdánlivá molová hmotnost suchých spalin

$$M = \sum_i M_i \cdot X_i = M_{N_2} \cdot X_{N_2} + M_{O_2} \cdot X_{O_2} + M_{CO_2} \cdot X_{CO_2} + M_{Ar} \cdot X_{Ar} \quad (2.24)$$

$$M = 28 \cdot 0,81 + 32 \cdot 0,0118 + 44 \cdot 0,165 + 39,9 \cdot 0,135 = 30,85 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Měrná plynová konstanta

$$r = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{30,85} = 269,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2.25)$$

Měrná vlhkost

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{18 \cdot 0,193}{30,85} = 0,1128 \quad (2.26)$$

x objemové zastoupení vodní páry ve spalinách

$$p_p = \frac{x \cdot p}{\frac{r_v}{r_p} + x} = \frac{0,113 \cdot 98100}{\frac{269,5}{462} + 0,113} = 15900 \text{ Pa} \quad (2.27)$$

Teplota rosného bodu odpovídající tomu to tlaku je podle tabulek 54,24 °C

2.4 Ztráty kotle

2.4.1 Mechanický nedopal

$$\xi_{MN} = 0$$

2.4.2 Chemický nedopal

Na rady konzultanta mi bylo doporučeno dále počítat s hodnotou 50 mg CO

$$\xi_{CN} = \frac{0,2116 \cdot \text{mgCO} \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_{i,red}} = \frac{0,2116 \cdot 50 \cdot 8,5278}{(21 - 3) \cdot 35,902} = 0,00014 \quad (2.28)$$

Kde teplo přivedené do kotle se vypočítá

$$Q_p^p = Q_i^r(20^\circ\text{C}) + Q_{VZV} = 33643,3 + 402,7 = 34,046 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.29)$$

Teplo pro předehřátí vzduchu odběrovou parou z 20 na 50 °C

$$Q_{VZV} = \beta_{OVZ} \cdot \Delta I_{VZmin} = 1,05 \cdot 383,6 = 402,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.30)$$

2.4.3 Ztráty sdílením tepla do okolí

Pro danou povrchovou úpravu a výkon je ztráta podle [2]

$$\xi_S = 0,74 \%$$

Hliníkový nátěr opalovaný

2.4.4 Komínová ztráta

Pro přesnější odhad teploty odchodu spalin z kotle provedeme názornou energetickou bilanci pro ohřívák vzduchu. Protože je zadaná teplota napájecí vody (142 °C), tak odhaduji teplotu spalin přicházejících na ohřívák vzduch 156,5 °C. Aby nedošlo k podkročení teploty rosného bodu spalin, je vzduch jdoucí do ohříváku nejprve předehřán odběrovou parou z 20 °C na 50 °C a na výstupu z ohříváku předpokládám 100 °C. Záměrně se nesnažím zvýšit teplotu ohřátého vzduchu vstupujícího do kotle, protože teplota nad 100 °C má negativní vliv na emise, především zvyšuje na tvorbu NO_x. Nyní si určíme teplotu spalin, která je snížena o teplo odevzdané na ohřátí vzduchu.

$$I_{SP(156,5^\circ\text{C})} = 2413,22 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$I_{VZ(50^\circ\text{C})} = 668,28 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$I_{VZ(100^\circ\text{C})} = 1346,87 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$I_{SP} = I_{SP(156,5^{\circ}C)} + I_{VZ(50^{\circ}C)} - I_{VZ(100^{\circ}C)} = 2413,22 + 668,28 - 1346,87 \quad (2.31)$$

$$I_{SP} = 1734,62 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Odtud si určíme lineární interpolací teplotu odchodu spalin, která je 112,97 °C.

Dále entalpii okolního vzduchu za kotlem ($\alpha = 1$) pro teplotu 20 °C

$$I_{VZmin} = 252,90 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Velikost komínové ztráty získáme ze vztahu

$$\xi_K = \frac{I_{SP} - \alpha \cdot I_{VZ}}{Q_p^p} = \frac{1734,62 - 1,05 \cdot 252,90}{34046} = 0,0432 \quad (2.32)$$

2.4.5 Účinnost kotle

$$\eta_K = (1 - \xi_{CN} - \xi_S - \xi_K) \cdot 100 = (1 - 0,00014 - 0,0074 - 0,0432) \cdot 100 \quad (2.33)$$

$$\eta_K = 94,80 \%$$

3 Výkon kotle

3.1 Teplo přivedené do kotle

Celkové přivedené teplo do kotle palivem se skládá z výhřevnosti paliva při normálních podmínkách a fyzického tepla paliva. Plynné palivo vstupuje do spalovací komory při teplotě 20°C a neobsahuje žádnou vodu, ale spalovací vzduch je ohříván odběrovou parou na 50 °C. Výsledné teplo 1 m³ paliva přivedené do kotle máme již určeno z předchozí kapitoly

$$Q_p^p = 34,046 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Parní výkon kotle

$$M_{pp} = 80 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

3.2 Výrobní teplo páry

Mnou počítaný kotel neobsahuje žádný mezipřehřívák páry, ale jen odběr páry pro předeřev spalovacího vzduchu. Rady konzultanta neuvažujeme ani s odluhem bubnu. Entalpii páry a vody jsem si určil pomocí programu [4]. Vzorec se nám zjednoduší na tvar

$$Q^v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 22,22 \cdot (3408,78 - 604,22) = 62,32 \text{ MW} \quad (3.1)$$

Parametry přehřáté páry

$$p_{pp} = 9,32 \text{ MPa}, t_{pp} = 510 \text{ °C} \rightarrow I_{pp} = 3408,78 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Parametry napájecí vody

$$p_{nv} = 10,32 \text{ MPa}, t_{nv} = 142 \text{ °C} \rightarrow I_{nv} = 604,22 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

3.3 Množství paliva

Skutečné (výpočtové) množství paliva M_{pv} se rovná množství palivu přivedenému do kotle, protože nedochází ke ztrátě mechanickým nedopalem. Při dané účinnosti kotle je spotřeba paliva následující:

$$M_{pv} = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_K}{100}} = \frac{62324}{34046 \cdot \frac{94,8}{100}} = 1,931 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

4 Výpočet spalovací komory

Hlavním cílem výpočtu spalovací komory je určení jejich rozměrů, ale především výpočet střední teploty spalin na konci spalovací komory. Nejprve se určí užitečné teplo uvolněné při spalování, ze kterého získáme teoretickou teplotu, dále odhadneme teplotu spalin na konci spalovací komory a její entalpii. Určíme si součinitel M , stupeň černosti ohniště a Boltzmanovo číslo. Koncová teplota je funkcí těchto vypočtených veličin. Vypočtená hodnota teploty spalin by se neměla lišit od námi zvolené o více než ± 50 °C, ale s využitím programu Excel je dané přiblížení přesnější.

4.1 Objem ohniště

Je dán objemem spalovací komory, do které se musí započítat i objem dolní zešíkmené části, část spalinovou po první výměnné plochy a odečíst vrchní klenbu (šíkminu).

$$V_o = V_{hlč} + V_{dč} + V_{hc} - V_{vč} = 121,23 + 2,72 + 15,74 - 1,26 = 135,41 \text{ m}^3 \quad (4.1)$$

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{1,931 \cdot 34046}{138,44} = 485,49 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.2)$$

Průřezové zatížení ohniště

$$q_f = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{f} = \frac{1,931 \cdot 34,046}{6,16 \cdot 3,28} = 3,25 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.3)$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{\dot{u}} = F_{st} \cdot x = 160,75 \cdot 1 = 160,75 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

x je úhlový součinitel povrchu stěn ohniště

Celkový povrch stěn ohniště

$$F_{st} = 160,75 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

F_{st} je celková plocha povrchu ohniště po odečtení ploch hořáků

4.2 Součinitel M

Součinitel M představuje polohu maximální teploty plame a jeho hodnota je především závislá na vlastnostech použitých hořácích. V mém případě jsem zvolil variantu se dvěma hořáky umístěnými na spodní stěně spalovací komory a směřujících kolmo vzhůru.

Pro plynná paliva je [1]

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_{pl} = 0,54 - 0,2 \cdot 0,3 = 0,48 \quad (4.6)$$

$x_{pl} = 0,3$ je poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene (voleno)

4.3 Boltzmanovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{SP}} \cdot c}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot F_u \cdot T_a^3} = \frac{0,9923 \cdot 1,931 \cdot 20,12}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 163,58 \cdot (1901,53 + 273,15)^3} = 0,5026 \quad (4.7)$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{so}}{\eta_k + Z_{so}} = 1 - \frac{0,74}{94,8 + 0,74} = 0,9923 \quad (4.8)$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{SP}} \cdot c = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{34985,44 - 21654,12}{1901,53 - 1239,36} = 20,52 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.9)$$

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - Z_{co} - Z_c - Z_{fs}}{100 - Z_c} + Q_{VZ} - Q_{VZV} + r \cdot I_{SPod} \quad (4.10)$$

$$I_u = 34046 \cdot \frac{100 - 0,014 - 0 - 0}{100 - 0} + 1346,87 - 402,75 + 0 = 34985,44 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota ohřátého vzduchu je volena z tepelné bilance v kapitole 2.4.4 Komínová ztráta. Recirkulaci neuvažujeme.

$$Q_{VZ} = \alpha \cdot I_{VZmin} = 1,05 \cdot 1282,70 = 1346,87 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4.11)$$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

$$\overline{\Psi} = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,8 = 0,8 \quad (4.12)$$

$x = 1$ je úhlový faktor stěny (voleno pro membránovou stěnu)

$\xi = 0,8$ je součinitel zanesení stěn voleno dle [2]

4.4 Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \overline{\Psi}} = \frac{0,392}{0,392 + (1 - 0,392) \cdot 0,8} = 0,446 \quad (4.13)$$

Efektivní stupeň černosti plamene

Tento součinitel zohledňuje podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene. Závisí především na druhu paliva. U spalování kapalných a plynných paliv pro objemové zatížení a jednodrostorového ohniště dostáváme hodnotu koeficientu $m = 0,185$ a tvar rovnice

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,185 \cdot 0,643 + (1 - 0,185) \cdot 0,335 = 0,392 \quad (4.14)$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{ns} = 1 - e^{-k_{ns} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,343 \cdot 0,1 \cdot 3,03} = 0,335 \quad (4.15)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,0284 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

jedná o kotel s mírně přetlakovým ohništěm, tak volím tlak $p = 0,1 \text{ MPa}$

Objemová část tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,1934 + 0,0901 = 0,284 \text{ MPa} \quad (4.17)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{F_{\dot{u}}} = 3,6 \cdot \frac{135,41}{160,75} = 3,033 \quad (4.18)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítilivými tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (4.19)$$

$$k = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1983}{3,16 \cdot \sqrt{0,028 \cdot 3,03}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{(1239,36 + 273,15)}{1000} \right) \cdot 0,02$$

$$k = 1,343 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti svítivé části plamene

$$a_{sv} = 1 - e^{-k_{sv} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3,4 \cdot 0,1 \cdot 3,03} = 0,643 \quad (4.20)$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku plynu

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} \cdot C_m H_n \quad (4.21)$$

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

$$\frac{C^r}{H^r} = 2,98$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - \alpha) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_0}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (4.22)$$

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - 1,05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{(1239,1 + 273,15)}{1000} - 0,5 \right) \cdot 2,98 = 2,05 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,9923 \cdot (34985,44 - 21597,64) = 13284,11 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.23)$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_0)}{F_{\dot{u}}} = \frac{0,9923 \cdot 1,931 \cdot (34985,44 - 21597,64)}{160,75} \quad (4.24)$$

$$\bar{q} = 159,57 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

4.5 Teplota spalin na výstupu z ohniště

Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_0 + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{\alpha_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1901,53 + 273,15}{1 + 0,48 \cdot \left(\frac{0,446}{0,514}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1236,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.25)$$

Entalpie spalin pro teplotu $\vartheta_0 = 1236,1 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$I_0 = 21597,64 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Odchylka teplot na konci spalovací komory

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{Odhad} - \vartheta_0 = 1239,36 - 1236,10 = 3,26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.26)$$

Odchylka vyhovuje toleranci $\pm 50^\circ\text{C}$

5 Návrh výhřevných ploch

Následující tabulka zobrazuje parametry média v jednotlivých částech kotle. Zajímavé je, že všemi výhřevnými plochami proudí stejné množství média (kromě OVZ), protože vstříky jsou realizovány jako teplosměnné plochy v bubnu.

PLOCHA		TEPLOTA [°C]	TLAK [MPa]	ENTALPIE [kJ/kg]	MĚRNÝ OBJEM [m ³ /kg]	ENT. SPÁD [kJ/kg]	TEP. VÝKON [MW]
PIII	Vstup	404,65	9,52	3121,68	0,02838	287,10	6,3800
	Výstup	510,00	9,32	3408,78	0,03604		
PII	Vstup	335,66	9,72	2874,13	0,02193	298,92	6,6427
	Výstup	422,30	9,52	3173,05	0,02963		
PI	Vstup	316,83	9,92	2768,51	0,01912	175,83	3,9073
	Výstup	352,80	9,72	2944,34	0,02358		
Závěsné tr.	Vstup	311,14	10,02	2725,11	0,01799	43,40	0,9644
	Výstup	316,83	9,92	2768,51	0,01920		
Výparník	Vstup	311,14	10,02	1408,69	0,00145	1316,42	29,2538
	Výstup	311,14	10,02	2725,11	0,01799		
EKO	Vstup	142,00	10,32	604,22	0,00108	682,43	15,1652
	Výstup	289,80	10,02	1286,66	0,00136		

Tab. 3 Parametry páry v jednotlivých výhřevných plochách

5.1 Tlakové ztráty

Při proudění média v trubkách vznikají určité tlakové ztráty, které nejsou zanedbatelné a je nutno s nimi počítat. Tlakové ztráty v jednotlivých teplosměnných plochách jsem stanovil na základě rad konzultanta. Výstupní tlak přehřáté páry je daný, pro výpočet tlaku napájecí vody použijeme následující vzorec.

$$\text{Ekonomizér} \quad \Delta p_{Eko} = 0,3 \text{ MPa}$$

$$\text{Závěsné trubky} \quad \Delta p_{Záv} = 0,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Přehřívák 1} \quad \Delta p_{P1} = 0,2 \text{ MPa}$$

$$\text{Přehřívák 2} \quad \Delta p_{P2} = 0,2 \text{ MPa}$$

$$\text{Přehřívák 3} \quad \Delta p_{P3} = 0,2 \text{ MPa}$$

Tlak napájecí vody

$$p_{Nv} = p_{3out} + \Delta p_{Eko} + \Delta p_{Záv} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P3} \quad (5.1)$$

$$p_{Nv} = 9,32 + 0,3 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 = 10,32 \text{ MPa}$$

5.2 Přehřívák P3

Přehřívák P3 je ze strany média poslední výhřevná plocha. Pára z něj již odchází na turbínu.

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{P3in} = 404,65 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P3in} = 9,52 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P3in} = 3121,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Teplota	$t_{P3out} = 510,00 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P3out} = 9,32 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P3out} = 3408,78 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu v přehříváku P3

$$\Delta I_{P3} = I_{P3out} - I_{P3in} = 3408,78 - 3121,68 = 287,10 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.2)$$

$$\text{Průtok média P3} \quad M_{P3} = M_{pp} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tepelný výkon přenesený přehřívákem

$$Q_{P3} = M_{P3} \cdot \Delta I_{P3} = 22,22 \cdot 287,10 = 6380 \text{ kW} \quad (5.3)$$

5.3 Přehřívák P2

Přehřívák P2 je ze strany média předposlední výhřevná plocha. Teplota výstupní páry z tohoto přehříváku je regulovaná pomocí trubkového výměníku tepla umístěného v bubnu. Výkon výměníku odpovídá klasickému vstříku, při směšování 2% napájecí vody s přehřátou parou.

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{P2in} = 335,66 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P2in} = 9,72 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P2in} = 2874,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Teplota	$t_{P2out} = 422,30 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P2out} = 9,52 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P2out} = 3173,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet výstupní entalpie

$$I_{P2out} = \frac{M_{P3} \cdot I_{P3in} - 0,02 \cdot M_{pp} \cdot I_{Nv}}{0,98 \cdot M_{pp}} = \frac{22,22 \cdot 3121,68 - 0,02 \cdot 22,22 \cdot 604,22}{0,98 \cdot 22,22} \quad (5.4)$$

$$I_{P2out} = 3173,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výpočet entalpického spádu v přehříváku P2

$$\Delta I_{P2} = I_{P2out} - I_{P2in} = 3173,05 - 2874,13 = 298,92 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.5)$$

Průtok média P2 $M_{P2} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tepelný výkon přenesený přehřívákem

$$Q_{P2} = M_{P2} \cdot \Delta I_{P2} = 22,22 \cdot 298,92 = 6643 \text{ kW} \quad (5.6)$$

5.4 Přehřívák P1

Přehřívák P1 je umístěn mezi závěsnými trubkami a přehřívákem P2. Opět je teplota výstupní páry regulovaná pomocí výměníku umístěného v bubnu. Nyní výkon vstříku odpovídá smíchání 3% napájecí vody a

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{P1in} = 316,83 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P1in} = 9,92 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P1in} = 2768,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výstup	Teplota	$t_{P1out} = 352,80 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{P1out} = 9,72 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{P1out} = 2944,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet výstupní entalpie

$$I_{P1out} = \frac{M_{P2} \cdot I_{P2in} - 0,03 \cdot M_{pp} \cdot I_{Nv}}{0,97 \cdot M_{pp}} = \frac{22,22 \cdot 2874,13 - 0,03 \cdot 22,22 \cdot 604,22}{0,97 \cdot 22,22} \quad (5.7)$$

$$I_{P1out} = 2944,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výpočet entalpického spádu v přehříváku P1

$$\Delta I_{P1} = I_{P1out} - I_{P1in} = 2944,34 - 2768,51 = 175,83 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.8)$$

Průtok média P1 $M_{P1} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tepelný výkon přenesený přehřívákem

$$Q_{P1} = M_{P1} \cdot \Delta I_{P1} = 22,22 \cdot 175,83 = 3907 \text{ kW} \quad (5.9)$$

5.5 Závěsné trubky

Závěsné trubky jsou výhřevná plocha situovaná mezi výparníkem a přehřívákem P1 ve směru proudění média. Slouží jako opora k zavěšení přehříváků P2 a P3 ve spalinovém kanálu.

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Závín} = 311,14 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Závín} = 10,02 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Závín} = 2725,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Teplota	$t_{Závout} = 316,83 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Závout} = 9,92 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Závout} = 2768,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu v závěsných trubkách

$$\Delta I_{Záv} = I_{Závout} - I_{Závín} = 2768,51 - 2725,11 = 43,40 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.10)$$

Průtok média Závěs. trub. $M_{Záv} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tepelný výkon přenesený závěsnými trubkami

$$Q_{Záv} = M_{Záv} \cdot \Delta I_{Záv} = 22,22 \cdot 43,40 = 964 \text{ kW} \quad (5.11)$$

5.6 Výparník

Ve výparníku dochází k fázové přeměně za konstantního tlaku a teploty. Z vody se stává sytá pára, přičemž je zapotřebí velké množství tepla. Proto má výparník největší teplosměnnou plochu. Nedohřev vody je kompenzován v bubnu kotle a jeho teplo se připočte do výparnickové části. Naopak při ochlazování přehřáté páry (regulace teploty přehřáté páry) v bubnu se získává teplo, které se odečítá od celkového tepla potřebného k fázové změně. Výparník je tvořen boky spalovací komory, dále sem patří spalinová mříž a stěny celého spalovacího kanálu od P2 až po oblast Eko2.

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Výp} = 311,14 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Výp} = 10,02 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Výpin} = 1408,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Entalpie	$I_{Výpout} = 2725,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu ve výparníku

$$\Delta I_{Výp} = I_{Výpout} - I_{Výpin} = 2725,11 - 1408,69 = 1316,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.12)$$

Průtok média Výparníkem $M_{Výp} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tepelný výkon přijatý výparníkem bez nedohřevu a vstříků

$$Q'_{Výp} = M_{Výp} \cdot \Delta I_{Výp} = 22,22 \cdot 1316,42 = 29253,8 \text{ kW} \quad (5.13)$$

Celkový tepelný výkon přijatý ve výparníku

$$Q_{Výp} = Q'_{Výp} + Q_{Nedohřev} - Q_{vstříků} = 29253,8 + 2711,8 - 2701,8 \quad (5.14)$$

$$Q_{Výp} = 29263,8 \text{ kW}$$

Nejvíce tepla se přijme ve spalovací komoře

$$Q_{Výpsk} = M_{pv} \cdot (I_u - I_o) = 1,931 \cdot (34985,44 - 21597,64) = 25649,90 \text{ kW} \quad (5.15)$$

Zbytek tepla převzaté mimo spalovací komoru

$$Q_{Výpbez sk} = Q'_{Výp} - Q_{Výpsk} = 29263,8 - 25649,9 = 3613,9 \text{ kW} \quad (5.16)$$

5.7 Ekonomizér

Ekonomizér slouží k ohřevu napájecí vody. Voda vycházející z Eka je vedena do výparníku o nedohřevu 21,34 °C. Ekonomizér je rozdělen na 2 části Eko 1 a Eko 2.

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Eko\text{in}} = 142,00 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Eko\text{in}} = 10,32 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko\text{in}} = 604,22 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výstup	Teplota	$t_{Eko\text{out}} = 289,80 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Eko\text{out}} = 10,02 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko\text{out}} = 1286,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu v ekonomizéru

$$\Delta I_{Eko} = I_{Eko\text{out}} - I_{Eko\text{in}} = 1286,66 - 604,22 = 682,43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.17)$$

Průtok média Ekem $M_{Eko} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tepelný výkon přenesený ekonomizérem

$$Q_{Eko} = M_{Eko} \cdot \Delta I_{Eko} = 22,22 \cdot 682,43 = 15165,2 \text{ kW} \quad (5.18)$$

Nedohřev

$$t_{Nedohřev} = t_{Výp} - t_{Ekoout} = 311,14 - 289,80 = 21,34 \text{ °C} \quad (5.19)$$

Teplo nedohřevu

$$Q_{Nedohřev} = M_{pp} \cdot (I_{Výpin} - I_{Ekout}) = 22,22 \cdot (1408,69 - 1286,66) \quad (5.20)$$

$$Q_{Nedohřev} = 2711,8 \text{ kW}$$

5.8 Ekonomizér 2

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Eko2in} = 206,10 \text{ °C}$
	Tlak	$p_{Eko2in} = 10,17 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko2in} = 883,20 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Teplota	$t_{Eko2out} = 289,80 \text{ °C}$
	Tlak	$p_{Eko2out} = 10,02 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko2out} = 1286,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu v ekonomizéru 2

$$\Delta I_{Eko2} = I_{Eko2out} - I_{Eko2in} = 1286,66 - 883,20 = 403,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.21)$$

$$\text{Průtok média Ekem 2} \quad M_{Eko2} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tepelný výkon přenesený ekonomizérem

$$Q_{Eko2} = M_{Eko2} \cdot \Delta I_{Eko2} = 22,22 \cdot 403,45 = 8965,6 \text{ kW} \quad (5.22)$$

5.9 Ekonomizér 1

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Eko1in} = 142,00 \text{ °C}$
	Tlak	$p_{Eko1in} = 10,32 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko1in} = 604,22 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstup	Teplota	$t_{Eko1out} = 206,10 \text{ °C}$
	Tlak	$p_{Eko1out} = 10,17 \text{ MPa}$
	Entalpie	$I_{Eko1out} = 883,20 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Výpočet entalpického spádu v ekonomizéru 1

$$\Delta I_{Eko1} = I_{Eko1out} - I_{Eko1in} = 883,20 - 604,22 = 278,98 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.23)$$

Průtok média Ekem 1 $M_{Eko1} = M_{PP} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

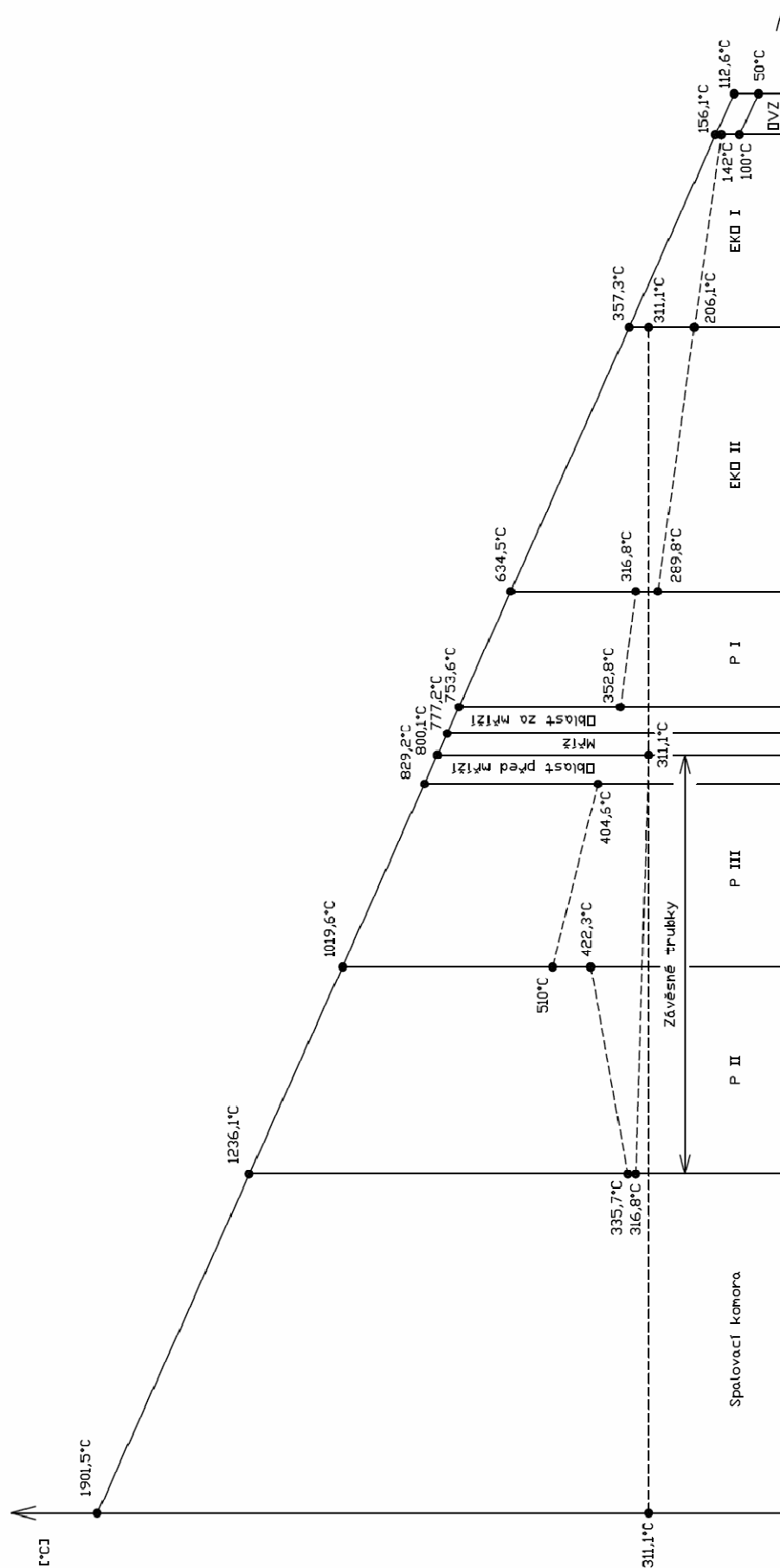
Tepelný výkon přenesený ekonomizérem

$$Q_{Eko1} = M_{Eko1} \cdot \Delta I_{Eko1} = 22,22 \cdot 278,98 = 6199,6 \text{ kW} \quad (5.24)$$

5.10 Celkové přijaté teplo médiiem

$$Q_{Celk}^M = Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} + Q_{Záv} + Q_{Výp} + Q_{Eko} \quad (5.25)$$

$$Q_{Celk}^M = 6380 + 6642,7 + 3907,3 + 964,4 + 29253,8 + 15165,2 = 62323,5 \text{ kW}$$



Obr. 5-1 Pilový diagram

6 Oblast přehříváku P2

Oblast se nachází v prvním tahu kotle nad ohništěm. Dominantní výhřevnou plochou je příčně obtékáný přehřívák P2 a dále jsou zde závěsné trubky a část výparníku v podobě membránových stěn spalínového kanálu.

Přehřívák je tvořen 32 dvouhady, které jsou uspořádány za sebou, protože mezi jednotlivými řadami přehříváku prochází závěsné trubky. Ty slouží k uchycení přehříváku P2

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 1,3$ až $1,7$ m

Šířka $B = 3,2$ m

Hloubka $C = 3,28$ m

6.1 Přehřívák P2

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0337$ m

Vnitřní průměr $d = 0,0237$ m

Tloušťka stěny $s = 0,005$ m

Příčná rozteč $s_1 = 0,1$ m

Počet řad příčně $z_1 = 32$

Podélná rozteč $s_2 = 0,0686$ m

Počet řad podélně $z_2 = 4$

Střední délka hadů $l_h = 3,09$ m

Počet hadů $x = 2$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 335,66$ °C

Tlak $p_{Mi} = 9,72$ MPa

Výstup Teplota $t_{Mo} = 422,30$ °C

Tlak $p_{Mo} = 9,52$ MPa

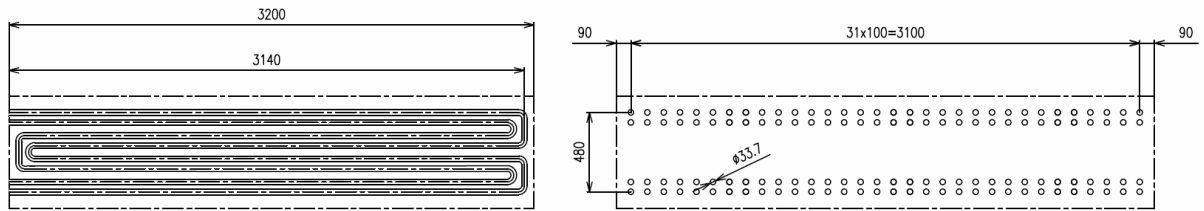
Parametry spalín

Vstup Teplota $t_{SPi} = 1236,10$ °C

Entalpie $I_{SPi} = 21597,64$ kJ · m⁻³

Výstup Teplota $t_{SPO} = 1019,60$ °C

Entalpie $I_{SPO} = 17424,87$ kJ · m⁻³



Obr. 7-1 Schéma přehříváku P2

6.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{422,30 + 335,66}{2} = 378,98 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.1)$$

Střední tlak páry

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{9,52 + 9,72}{2} = 9,62 \text{ MPa} \quad (6.2)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,026102 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,0237^2}{4} \right) \cdot 32 \cdot 2 = 0,0282 \text{ m}^2 \quad (6.3)$$

Rychlost páry

$$w_P = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,026102}{0,0282} = 20,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.4)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\text{Součinitel dynamické viskozity} \quad \eta = 242 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{Součinitel kinematické viskozity} \quad \nu = 6,3166 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti} \quad \lambda = 68,21 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Měrná tepelná kapacita} \quad c_p = 3,25 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{242 \cdot 10^{-7} \cdot 3,25 \cdot 1000}{68,21 \cdot 10^{-3}} = 1,153 \quad (6.5)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1 \text{ pro ohřívání páry, } C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr $d_e = d = 0,0237 \text{ m}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (6.6)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{68,21 \cdot 10^{-3}}{0,0237} \cdot \left(\frac{20,54 \cdot 0,0237}{6,3166 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,153^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 3590,30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{1019,60 + 1236,10}{2} = 1127,85 \text{ °C} \quad (6.7)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15}\right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 1127,85}{273,15}\right) \quad (6.8)$$

$$O_{SP} = 110,55 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_h - n_z \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_z^2}{4}\right) \quad (6.9)$$

$$F_{SP} = 3,2 \cdot 3,28 - 32 \cdot 0,0337 \cdot 3,09 - 35 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,038^2}{4}\right) = 7,124 \text{ m}^2$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{110,55}{7,124} = 15,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.10)$$

Určení podélné rozteče

$$s_2 = \frac{3 \cdot 0,08 + 4 \cdot 0,06}{7} = 0,0686 \text{ m} \quad (6.11)$$

3 mezery s roztečí 0,08 m a 4 mezery s roztečí 0,06 m

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,0337} = 2,967 \quad (6.12)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0686}{0,0337} = 2,035 \quad (6.13)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} = \frac{2,967 - 1}{2,035 - 1} = 1,901 \quad (6.14)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,967 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,035}{2}\right)^3\right]^2} = 1 \quad (6.15)$$

$$C_z = 1$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 193,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,119 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,552 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 193,3 \cdot 10^{-6} = 197,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.16)$$

 $M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15}\right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{1127,85 + 273,15}\right) = 0,234 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.17)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{197,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,552 \cdot 0,234 \cdot 1000}{0,119} \cdot 1,05 = 0,6313 \quad (6.18)$$

 $M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekci (příčné obtékání)

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.19)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,119}{0,0337} \cdot \left(\frac{15,52 \cdot 0,0337}{197,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6313^{0,33} = 102 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,686}{0,0337^2} - 1 \right) = 0,203 \quad (6.20)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (6.21)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (6.22)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 1127,85 + 273,15 = 1401,00 \text{ °C} \quad (6.23)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (6.24)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,203}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1401,00}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 6,065 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 6,065 \cdot 0,1 \cdot 0,203 = 0,123 \quad (6.25)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,123} = 0,1158 \quad (6.26)$$

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 378,98 + 25 + 273,15 = 677,13 \text{ K} \quad (6.27)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (6.28)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1158 \cdot 1401^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{677,13}{1401}\right)^{3,6}}{1 - \frac{677,13}{1401}}$$

$$\alpha_{Sál} = 29,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

6.1.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku

Střední logaritmický teplotní spád (soupled)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{900,44 - 597,30}{\ln \frac{900,44}{597,30}} = 738,53 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.29)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1236,10 - 335,66) = 900,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (1021,23 - 422,30) = 597,30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{Sál} = 102 + 29,32 = 131,29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.30)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_P}} = \frac{0,85 \cdot 131,29}{1 + \frac{131,29}{3590,30}} = 107,66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.31)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha přehříváku

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,0337 \cdot 32 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3,09 = 83,75 \text{ m}^2 \quad (6.32)$$

Potřebná (ideální) plocha přehříváku

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{P2}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 6642,7}{107,66 \cdot 738,53} = 83,54 \text{ m}^2 \quad (6.33)$$

Odchylka skutečné plochy přehříváku od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{83,75 - 83,54}{83,54} \cdot 100 = 0,24 \% \quad (6.34)$$

Přijatý tepelný výkon přehřívákem

$$Q_{P2}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{107,66 \cdot 83,75 \cdot 738,53}{1000} = 6658,9 \text{ kW} \quad (6.35)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je 0,24%, co je zanedbatelná hodnota.

6.2 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr	$D = 0,0603 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0503 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,08 \text{ m}$
Délka trubek	$l = 1,5 \text{ m}$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

6.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Vstupní a výstupní teploty spalin, průtočný průřez spalin a rychlost proudu spalin je shodná pro celou oblast přehříváku P2 a je již vypočtená v předchozí kapitole.

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P2

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 7,124}{217,055} = 0,131 \text{ m} \quad (6.36)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin, } C_l = 1, \quad C_m = 1$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

$$\text{Součinitel kinematické viskozity } \nu = 197,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti } \lambda = 0,119 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo } Pr = 0,6313$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (6.37)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,119}{0,131} \cdot \left(\frac{15,53 \cdot 0,131}{197,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6313^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 28,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Hodnota optické hustoty spalin a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast přehřívačku P2 a je vypočtená v předchozí kapitole.

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 0,123 \quad (6.38)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 0,1158 \quad (6.39)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{st} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (6.40)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (6.41)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1158 \cdot 1401^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{1401} \right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{1401}}$$

$$\alpha_{sál} = 27,47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

6.2.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{924,96 - 708,46}{\ln \frac{924,96}{708,46}} = 811,91 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.42)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1236,10 - 311,14) = 924,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (1019,60 - 311,14) = 708,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 28,23 + 27,47 = 55,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.43)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 55,70 = 47,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.44)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti přehříváku P2

$$S = 2 \cdot C \cdot (B + C) - F_{průlezu} = 2 \cdot 1,5 \cdot (3,2 + 3,28) - 0,291 = 19,15 \text{ m}^2 \quad (6.45)$$
$$F_{průlezu} = 0,291 \text{ m}^2 \text{ (půlka průlezu a trubky přehříváku)}$$

Přijatý tepelný výkon membránovou stěnou

$$Q_{P2}^{Memb} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{47,34 \cdot 19,15 \cdot 811,91}{1000} = 736,03 \text{ kW} \quad (6.46)$$

6.3 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr	$D = 0,038 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0254 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,0063 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,1 \text{ m}$
Počet trubek	$n_z = 35$
Střední délka trubky	$l_z = 3,7 \text{ m}$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 311,14 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 316,83 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 9,92 \text{ MPa}$

6.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{316,83 + 311,14}{2} = 313,98 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.47)$$

Střední tlak páry

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{9,92 + 10,02}{2} = 9,97 \text{ MPa} \quad (6.48)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,018569 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot n_z = \left(\frac{3,14 \cdot 0,0254^2}{4} \right) \cdot 35 = 0,0177 \text{ m}^2 \quad (6.49)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_p} = \frac{22,22 \cdot 0,018569}{0,0177} = 23,27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.50)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

Součinitel dynamické viskozity $\eta = 204,2 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 3,79 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 74,56 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 5,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{204,2 \cdot 10^{-7} \cdot 5,75 \cdot 1000}{74,56 \cdot 10^{-3}} = 1,575 \quad (6.51)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1 \text{ pro ohřívání páry, } C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = d = 0,0254 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekci (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (6.52)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{74,56 \cdot 10^{-3}}{0,0254} \cdot \left(\frac{23,27 \cdot 0,0254}{3,79 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,575^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 7285,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekci na straně spalin

Shodný jako u membránové stěny

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (6.53)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,119}{0,131} \cdot \left(\frac{15,53 \cdot 0,131}{197,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6313^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 28,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.3.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Hodnota optické hustoty spalin a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast přehřívačku P2 a je vypočtená u hlavní plochy oblasti.

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 313,98 + 25 + 273,15 = 612,13 \text{ K} \quad (6.54)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (6.55)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1158 \cdot 1401^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{612,13}{1401} \right)^{3,6}}{1 - \frac{612,13}{1401}}$$

$$\alpha_{sál} = 27,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

6.3.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{919,27 - 708,46}{\ln \frac{919,27}{708,46}} = 809,30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.56)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1236,10 - 316,83) = 919,27^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (1019,60 - 311,14) = 708,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 28,23 + 27,55 = 55,78 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (6.57)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_P}} = \frac{0,85 \cdot 55,78}{1 + \frac{55,78}{7285,83}} = 47,05 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (6.58)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha závěsných trubek v oblasti přehříváku P2

$$S = \pi \cdot D \cdot n_z \cdot l_z = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 35 \cdot 3,7 = 15,46 \text{ } m^2 \quad (6.59)$$

Přijatý tepelný výkon závěsnými trubkami

$$Q_{P2}^{Záv} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{47,05 \cdot 15,46 \cdot 809,30}{1000} = 588,61 \text{ } kW \quad (6.60)$$

6.4 Tepelná bilance v oblasti P2

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti přehříváku P2

$$Q_{P2}^{Celk} = Q_{P2}^{Skut} + Q_{P2}^{Mem} + Q_{P2}^{Záv} = 6658,87 + 736,03 + 588,61 \quad (6.61)$$

$$Q_{P2}^{Celk} = 7983,51 \text{ } kW$$

Bilanční teplo spalin v oblasti přehříváku P2

$$Q_{P2}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (21597,64 - 17424,87) \quad (6.62)$$

$$Q_{P2}^b = 7994,69 \text{ } kW$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{P2}^b - Q_{P2}^{Celk}}{Q_{P2}^b} \cdot 100 = \frac{7994,69 - 7983,51}{7994,69} \cdot 100 = 0,14 \text{ } \% \quad (6.63)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

7 Oblast přehříváku P3

Oblast se nachází v prvním tahu kotle nad přehřívákem P2. Hlavní výhřevnou plochou je příčně obtékaný přehřívák P3 a k němu doplňkovými plochami jsou závěsné trubky a část výparníku v podobě membránových stěn spalinového kanálu.

Přehřívák je tvořen 32 dvouhady, které jsou uspořádány za sebou, protože mezi jednotlivými řadami přehříváku prochází závěsné trubky. Ty slouží k uchycení přehříváku P3.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 1,25 \text{ m}$

Šířka $B = 3,2 \text{ m}$

Hloubka $C = 3,28 \text{ m}$

7.1 Přehřívák P3

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,038 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,028 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,005 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,1 \text{ m}$

Počet řad příčně $z_1 = 32$

Podélná rozteč $s_2 = 0,0729 \text{ m}$

Počet řad podélně $z_2 = 6$

Střední délka hadů $l_h = 3,11 \text{ m}$

Počet hadů $x = 2$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 404,65 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mi} = 9,52 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 510,00 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mo} = 9,32 \text{ MPa}$

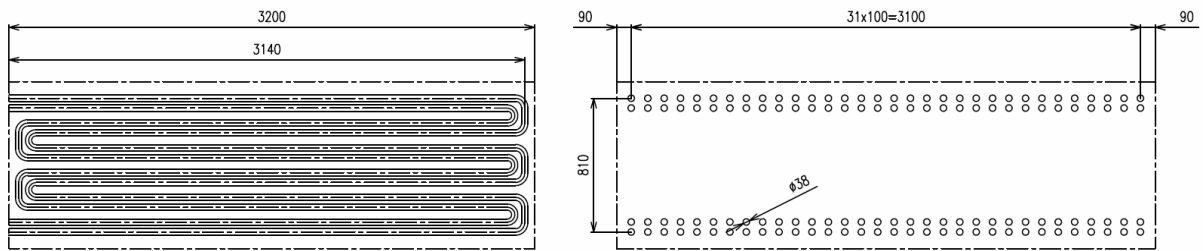
Parametry spalin

Vstup Teplota $t_{SPi} = 1019,60 \text{ }^\circ\text{C}$

Entalpie $I_{SPi} = 17424,87 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Výstup Teplota $t_{SPO} = 829,20 \text{ }^\circ\text{C}$

Entalpie $I_{SPO} = 13869,19 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 7-1 Schéma přehříváku P3

7.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{510 + 404,65}{2} = 457,33 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.1)$$

Střední tlak páry

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{9,32 + 9,52}{2} = 9,42 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,032338 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) \cdot 32 \cdot 2 = 0,0394 \text{ m}^2 \quad (7.3)$$

Rychlost páry

$$w_P = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,03234}{0,0394} = 18,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.4)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

$$\text{Součinitel dynamické viskozity} \quad \eta = 276 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{Součinitel kinematické viskozity} \quad \nu = 8,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti} \quad \lambda = 74,5 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Měrná tepelná kapacita} \quad c_p = 2,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{276 \cdot 10^{-7} \cdot 2,73 \cdot 1000}{74,5 \cdot 10^{-3}} = 1,01 \quad (7.5)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1 \text{ pro ohřívání páry, } C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr $d_e = d = 0,028 \text{ m}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (7.6)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{74,5 \cdot 10^{-3}}{0,028} \cdot \left(\frac{18,24 \cdot 0,028}{8,93 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,01^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 2479,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{829,20 + 1019,60}{2} = 924,40 \text{ °C} \quad (7.7)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15}\right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 924,40}{273,15}\right) \quad (7.8)$$

$$O_{SP} = 94,50 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_h - n_z \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_z^2}{4}\right) \quad (7.9)$$

$$F_{SP} = 3,2 \cdot 3,28 - 32 \cdot 0,038 \cdot 3,11 - 35 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,038^2}{4}\right) = 6,675 \text{ m}^2$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{94,50}{6,675} = 14,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.10)$$

Určení podélné rozteče

$$s_2 = \frac{5 \cdot 0,09 + 6 \cdot 0,06}{11} = 0,0736 \text{ m} \quad (7.11)$$

5 mezery s roztečí 0,09 m a 6 mezery s roztečí 0,06 m

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,632 \quad (7.12)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0736}{0,038} = 1,938 \quad (7.13)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} = \frac{2,632 - 1}{1,938 - 1} = 1,740 \quad (7.14)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,632 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,938}{2}\right)^3\right]^2} = 1 \quad (7.15)$$

$$C_z = 1$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 148 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,101 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,514 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 148 \cdot 10^{-6} = 151 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.16)$$

 $M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15}\right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{924,40 + 273,15}\right) = 0,274 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (7.17)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{151 \cdot 10^{-6} \cdot 1,514 \cdot 0,274 \cdot 1000}{0,101} \cdot 1,05 = 0,650 \quad (7.18)$$

 $M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.19)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,101}{0,038} \cdot \left(\frac{15,52 \cdot 0,038}{151 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,650^{0,33} = 93,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,736}{0,038^2} - 1 \right) = 0,188 \quad (7.20)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (7.21)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (7.22)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 924,40 + 273,15 = 1197,55 \text{ °C} \quad (7.23)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (7.24)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,188}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1197,55}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 7,297 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 7,297 \cdot 0,1 \cdot 0,188 = 0,1371 \quad (7.25)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,137} = 0,1281 \quad (7.26)$$

Teplota povrchu nánosu na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 457,33 + 25 + 273,15 = 755,48 \text{ K} \quad (7.27)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (7.28)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1281 \cdot 1197,55^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{755,48}{1197,55}\right)^{3,6}}{1 - \frac{755,48}{1197,55}}$$

$$\alpha_{Sál} = 24,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

7.1.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{509,60 - 424,55}{\ln \frac{509,60}{424,55}} = 465,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.29)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1019,60 - 510) = 509,60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (829,2 - 404,65) = 424,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{Sál} = 93,89 + 24,76 = 118,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7.30)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_P}} = \frac{0,85 \cdot 118,64}{1 + \frac{118,64}{2479,79}} = 96,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7.31)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha přehříváku

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 32 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 3,11 = 142,57 \text{ m}^2 \quad (7.32)$$

Potřebná (ideální) plocha přehříváku

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{P3}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 6380}{96,24 \cdot 465,78} = 142,33 \text{ m}^2 \quad (7.33)$$

Odchylka skutečné plochy přehříváku od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{142,57 - 142,33}{142,33} \cdot 100 = 0,17 \% \quad (7.34)$$

Přijatý tepelný výkon přehřívákem

$$Q_{P3}^{skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{96,24 \cdot 142,57 \cdot 465,78}{1000} = 6390,9 \text{ kW} \quad (7.35)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je 0,17%, co je zanedbatelná hodnota.

7.2 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0603 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,0503 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,005 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,08 \text{ m}$

Délka trubek $l = 1,25 \text{ m}$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

7.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Vstupní a výstupní teploty spalin, průtočný průřez spalin a rychlost proudu spalin je shodná pro celou oblast přehříváku P3 a je již vypočtená v předchozí kapitole.

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P3

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 6,675}{218,61} = 0,122 \text{ m} \quad (7.36)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$C_t = 1$ pro ochlazování spalin, $C_l = 1$, $C_m = 1$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 151 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,101 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,650$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (7.37)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,101}{0,122} \cdot \left(\frac{14,16 \cdot 0,131}{151 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,650^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 28,29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

Hodnota optické hustoty spalín a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast přehřívačku P3 a je vypočtená v předchozí kapitole.

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 0,1371 \quad (7.38)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 0,1281 \quad (7.39)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (7.40)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (7.41)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1281 \cdot 1197,55^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{1197,55} \right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{1197,55}}$$

$$\alpha_{sál} = 20,96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

7.2.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{708,46 - 518,06}{\ln \frac{708,46}{518,46}} = 608,30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.42)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1019,60 - 311,14) = 708,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (829,20 - 311,14) = 518,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 28,29 + 20,96 = 49,25 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (7.43)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 49,25 = 41,87 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (7.44)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti přehříváku P3

$$S = 2 \cdot C \cdot (B + C) - F_{průlezu} = 2 \cdot 1,25 \cdot (3,2 \cdot 3,28) - 0,251 = 15,95 \text{ } m^2 \quad (7.45)$$

$$F_{průlezu} = 0,251 \text{ } m^2 \text{ (půlka průlezu)}$$

Přijatý tepelný výkon membránovou stěnou

$$Q_{P3}^{Memb} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{41,87 \cdot 15,95 \cdot 608,30}{1000} = 323,65 \text{ } kW \quad (7.46)$$

7.3 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,038 \text{ } m$

Vnitřní průměr $d = 0,0254 \text{ } m$

Tloušťka stěny $s = 0,0063 \text{ } m$

Příčná rozteč $s_1 = 0,1 \text{ } m$

Počet trubek $n_z = 35$

Střední délka trubky $l_z = 1,25 \text{ } m$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14 \text{ } ^\circ\text{C}$

 Tlak $p_{Mi} = 10,02 \text{ } MPa$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 316,83 \text{ } ^\circ\text{C}$

 Tlak $p_{Mo} = 9,92 \text{ } MPa$

7.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Shodný výpočet jako u závěsných trubek v oblasti přehříváku P2

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

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{74,56 \cdot 10^{-3}}{0,0254} \cdot \left(\frac{23,27 \cdot 0,0254}{3,79 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,575^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 7285,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Shodný výpočet jako u membránové stěny

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (7.48)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,119}{0,131} \cdot \left(\frac{15,53 \cdot 0,131}{197,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6313^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 28,29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.3.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Hodnota optické hustoty spalin a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast přehříváku P2 a je vypočtená u hlavní plochy oblasti.

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{\text{stř}} + \Delta t + 273,15 = 313,98 + 25 + 273,15 = 612,13 \text{ K} \quad (7.49)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ **Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (7.50)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1281 \cdot 1197,55^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{612,13}{1197,55} \right)^{3,6}}{1 - \frac{612,13}{1197,55}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 21,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$ **7.3.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek**

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{702,77 - 518,06}{\ln \frac{702,77}{518,06}} = 605,73 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.51)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (1019,60 - 316,83) = 702,77^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (829,20 - 311,14) = 518,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 28,23 + 21,03 = 49,32 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (7.52)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 49,32}{1 + \frac{49,32}{7285,83}} = 41,65 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (7.53)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha závěsných trubek v oblasti přehříváku P3

$$S = \pi \cdot D \cdot n_z \cdot l_z = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 35 \cdot 1,25 = 4,18 \text{ } m^2 \quad (7.54)$$

Přijatý tepelný výkon závěsnými trubkami

$$Q_{P3}^{Záv} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{41,65 \cdot 4,18 \cdot 605,73}{1000} = 131,76 \text{ } kW \quad (7.55)$$

7.4 Tepelná bilance v oblasti P3

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti přehříváku P3

$$Q_{P3}^{Celk} = Q_{P3}^{Skut} + Q_{P3}^{Memb} + Q_{P3}^{Záv} = 6390,9 + 323,65 + 131,76 \quad (7.56)$$

$$Q_{P3}^{Celk} = 6846,28 \text{ } kW$$

Bilanční teplo spalin v oblasti přehříváku P3

$$Q_{P3}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (17424,87 - 13869,19) \quad (7.57)$$

$$Q_{P3}^b = 6812,37 \text{ } kW$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{P3}^b - Q_{P3}^{Celk}}{Q_{P3}^b} \cdot 100 = \frac{6812,37 - 6846,28}{6812,37} \cdot 100 = -0,5 \text{ } \% \quad (7.58)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

8 Oblast před mříží

Oblast se nachází v prvním tahu kotle nad přehřívákem P3. Jedinými plochami jsou zde závěsné trubky, které jsou podélně obtékané proudem spalín a část výparníku v podobě membránových stěn spalínového kanálu.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 2,35$ až $2,65$ m

Šířka $B = 3,2$ m

Hloubka $C = 3,28$ m

8.1 Závěsné trubky

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,038$ m

Vnitřní průměr $d = 0,0254$ m

Tloušťka stěny $s = 0,0063$ m

Příčná rozteč $s_1 = 0,1$ m

Počet trubek $n_z = 35$

Střední délka trubky $l_z = 2,5$ m

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14$ °C

Tlak $p_{Mi} = 10,02$ MPa

Výstup Teplota $t_{Mo} = 316,83$ °C

Tlak $p_{Mo} = 9,92$ MPa

Parametry spalín

Vstup Teplota $t_{SPi} = 829,20$ °C

Entalpie $I_{SPi} = 13869,19$ kJ · m⁻³

Výstup Teplota $t_{SPo} = 800,10$ °C

Entalpie $I_{SPo} = 13332,44$ kJ · m⁻³

8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Shodný výpočet jako u závěsných trubek v oblasti přehříváku P2 a P3

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (8.1)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{74,56 \cdot 10^{-3}}{0,0254} \cdot \left(\frac{23,27 \cdot 0,0254}{3,79 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,575^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 7285,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

8.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{800,10 + 829,20}{2} = 814,65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.2)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15}\right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 814,65}{273,15}\right) \quad (8.3)$$

$$O_{SP} = 85,84 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - n_z \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_z^2}{4}\right) \quad (8.4)$$

$$F_{SP} = 3,2 \cdot 3,28 - 35 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,038^2}{4}\right) = 10,46 \text{ m}^2$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{85,84}{10,46} = 8,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8.5)$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 126 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0915 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,495 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 126 \cdot 10^{-6} = 128,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (8.6)$$

$M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{814,65 + 273,15} \right) = 0,301 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (8.7)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{128,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,495 \cdot 0,301 \cdot 1000}{0,0915} \cdot 1,05 = 0,664 \quad (8.8)$$

$M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P3

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 10,46}{8,78} = 4,76 \text{ m} \quad (8.9)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin,} \quad C_l = 1, \quad C_m = 1$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (8.10)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0915}{4,763} \cdot \left(\frac{8,21 \cdot 4,763}{128,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,664^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 9,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

8.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,8}{0,038^2} - 1 \right) = 0,189 \quad (8.11)$$

s_2 je vzdálenost mezi dvěma řadami závěsných trubek

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (8.12)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (8.13)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 814,65 + 273,15 = 1087,80 \text{ °C} \quad (8.14)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (8.15)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,189}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1087,80}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 2,347 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 2,347 \cdot 0,1 \cdot 0,189 = 0,4448 \quad (8.16)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,445} = 0,359 \quad (8.17)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 313,98 + 25 + 273,15 = 612,13 \text{ K} \quad (8.18)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (8.19)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,359 \cdot 1087,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{612,13}{1087,8}\right)^{3,6}}{1 - \frac{612,13}{1087,8}}$$

$$\alpha_{sál} = 47,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

8.1.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon závěsných trubek

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{512,37 - 488,96}{\ln \frac{512,37}{488,96}} = 500,58 \text{ °C} \quad (8.20)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (829,20 - 316,83) = 512,37 \text{ °C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (800,10 - 311,14) = 488,96 \text{ °C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 9,14 + 47,38 = 56,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.21)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_P}} = \frac{0,85 \cdot 56,52}{1 + \frac{56,52}{7285,83}} = 47,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.22)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha závěsných trubek v oblasti před mříží

$$S = \pi \cdot D \cdot n_z \cdot l_z = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 35 \cdot 2,5 = 10,45 \text{ m}^2 \quad (8.23)$$

Přijatý tepelný výkon závěsnými trubkami

$$Q_{PředM}^{Záv} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{47,05 \cdot 10,45 \cdot 500,58}{1000} = 249,33 \text{ kW} \quad (8.24)$$

8.2 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr	$D = 0,0603 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0503 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,08 \text{ m}$
Délka trubek	$l = 1,5 \text{ m}$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

8.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Shodný výpočet jako u membránové stěny

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (8.25)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0915}{4,763} \cdot \left(\frac{8,21 \cdot 4,763}{128,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,664^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 9,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

8.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

Hodnota optické hustoty spalín a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast před mříží a je vypočtená v předchozí kapitole závěsných trubek.

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (8.26)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (8.27)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3591 \cdot 1087,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{1087,8}\right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{1087,8}}$$

$$\alpha_{sál} = 47,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

8.2.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{518,06 - 488,96}{\ln \frac{518,06}{488,96}} = 503,37 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.28)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (829,20 - 311,14) = 518,06 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPO} - t_{MO}) = (800,10 - 311,14) = 488,96 \text{ }^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 9,14 + 47,21 = 56,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.29)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 56,35 = 47,90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.30)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti přehříváku P2

$$S = 2 \cdot A \cdot B + C \cdot (B' + A') - F_{průlezu} \quad (8.31)$$

$$S = 2 \cdot 2,5 \cdot 3,2 + 3,28 \cdot (3,22 + 2,35) - 0,503 = 32,41 \text{ m}^2$$

$$F_{průřezu} = 0,503 \text{ m}^2 \text{ (plocha průřezu)}$$

změna rozměrů kvůli zešikmení stropní části $\rightarrow A' = 2,35 \text{ m}, B' = 3,22 \text{ m}$

Přijatý tepelný výkon membránovou stěnou

$$Q_{PředM}^{Mem} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{47,9 \cdot 32,41 \cdot 503,37}{1000} = 781,50 \text{ kW} \quad (8.32)$$

8.3 Tepelná bilance v oblasti před mříží

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti před mříží

$$Q_{PředM}^{Celk} = Q_{PředM}^{Záv} + Q_{PředM}^{Mem} = 249,33 + 781,50 = 1030,83 \text{ kW} \quad (8.33)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti přehříváku P3

$$Q_{PředM}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (13869,19 - 13332,44) \quad (8.34)$$

$$Q_{PředM}^b = 1028,43 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{PředM}^b - Q_{PředM}^{Celk}}{Q_{PředM}^b} \cdot 100 = \frac{1028,43 - 1030,83}{1028,43} \cdot 100 = -0,23 \% \quad (8.35)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

9 Oblast mříže

Mříž se nachází v části kotle mezi prvním a druhým tahem, zde dochází k obratu proudu spalin. Mříž je součástí výparníku a je tvořena hladkými trubkami, které jsou obtékány příčně.

Rozměry počítané oblasti

Výška	$A = 2,5 \text{ m}$
Šířka	$B = 0,4 \text{ m}$
Hloubka	$C = 3,28 \text{ m}$

9.1 Membránová mříž

Základní parametry

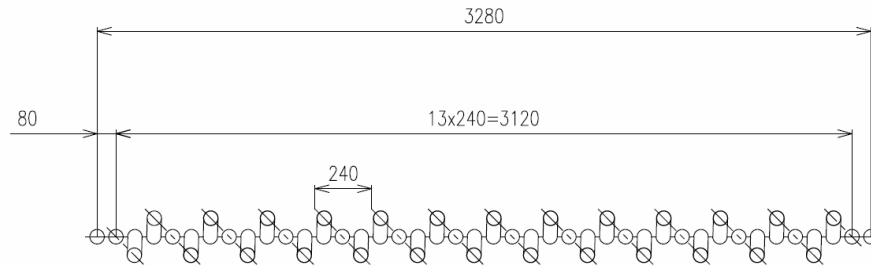
Vnější průměr	$D = 0,0603 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0503 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,24 \text{ m}$
Počet mezer příčně	$n_m = 13$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,11 \text{ m}$
Počet řad podélně	$z_2 = 3$
Střední délka trubky mříže	$l_t = 2,5 \text{ m}$
Počet trubek	$z = 40$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Parametry spalin

Vstup	Teplota	$t_{SPi} = 800,10 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPi} = 13332,44 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Výstup	Teplota	$t_{SPo} = 777,20 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPo} = 12918,10 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 9-1 Náskres spalinové mříže v řezu

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

9.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{800,10 + 777,2}{2} = 788,65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.1)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 788,650}{273,15} \right) \quad (9.2)$$

$$O_{SP} = 83,79 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spalinu

$$F_{SP} = n_m \cdot (s_1 - D) \cdot l_t = 13 \cdot (0,24 - 0,0603) \cdot 2,5 = 5,84 \text{ m}^2 \quad (9.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{83,79}{5,84} = 14,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.4)$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,24}{0,0603} = 3,980 \quad (9.5)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,11}{0,0603} = 1,824 \quad (9.6)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 3,98 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,824}{2}\right)^3\right]^2} \quad (9.7)$$

$$C_s = 0,993$$

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_2 - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (9.8)$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 121,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0893 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,490 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 121,3 \cdot 10^{-6} = 123,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.9)$$

$M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{sp}^{stř} + 273,15}\right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{788,65 + 273,15}\right) = 0,309 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (9.10)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{123,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1,490 \cdot 0,309 \cdot 1000}{0,0893} \cdot 1,05 = 0,669 \quad (9.11)$$

$M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.12)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,993 \cdot 0,9225 \cdot \frac{0,0893}{0,0603} \cdot \left(\frac{14,35 \cdot 0,0603}{123,7 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,65} \cdot 0,669^{0,33}$$

$$\alpha_k = 74,99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

9.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,24 \cdot 0,11}{0,0603^2} - 1\right) = 0,447 \quad (9.13)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (9.14)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (9.15)$$

Absolutní teplota spalín

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 788,65 + 273,15 = 1061,80 \text{ °C} \quad (9.16)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (9.17)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,447}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1061,8}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 5,093 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 5,093 \cdot 0,1 \cdot 0,447 = 0,2279 \quad (9.18)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,228} = 0,2038 \quad (9.19)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (9.20)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (9.21)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2038 \cdot 1061,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{1061,8}\right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{1061,8}}$$

$$\alpha_{Sál} = 25,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

9.1.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{488,96 - 466,06}{\ln \frac{488,96}{466,06}} = 477,42 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.22)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (800,10 - 311,14) = 488,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (777,20 - 311,14) = 466,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 74,99 + 25,39 = 100,38 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (9.23)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 100,38 = 85,33 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (9.24)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha mříže

$$S = \pi \cdot D \cdot z \cdot l_t = 3,14 \cdot 0,0603 \cdot 40 \cdot 2,5 = 19,42 \text{ } m^2 \quad (9.25)$$

Přijatý tepelný výkon mříží

$$Q_{Mříž}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{85,33 \cdot 19,42 \cdot 477,42}{1000} = 791,00 \text{ } kW \quad (9.26)$$

9.2 Tepelná bilance v oblasti mříže

Celkové přijaté teplo mříží

$$Q_{Mříž}^{Celk} = Q_{Mříž}^{Skut} = 791,00 \text{ } kW \quad (9.27)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti mříže

$$Q_{Mříž}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (13332,44 - 12918,10) \quad (9.28)$$

$$Q_{Mříž}^b = 793,85 \text{ } kW$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{Mříž}^b - Q_{Mříž}^{Celk}}{Q_{Mříž}^b} \cdot 100 = \frac{793,85 - 791,00}{793,85} \cdot 100 = 0,35 \text{ } \% \quad (9.29)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

10 Oblast za mříží

Oblast se nachází v druhém tahu kotle nad přehřívákem P1. Jedinou výhřevnou plochou výparník v podobě membránové stěny spalínového kanálu.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 2,38$ až $2,62$ m

Šířka $B = 2,96$ m

Hloubka $C = 3,28$ m

10.1 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0603$ m

Vnitřní průměr $d = 0,0503$ m

Tloušťka stěny $s = 0,005$ m

Příčná rozteč $s_1 = 0,08$ m

Střední délka trubky mříže $l = 2,5$ m

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14$ °C

Tlak $p_{Mi} = 10,02$ MPa

Výstup Teplota $t_{Mo} = 311,14$ °C

Tlak $p_{Mo} = 10,02$ MPa

Parametry spalin

Vstup Teplota $t_{SPi} = 777,20$ °C

Entalpie $I_{SPi} = 12918,10$ kJ · m⁻³

Výstup Teplota $t_{SPo} = 753,60$ °C

Entalpie $I_{SPo} = 12491,13$ kJ · m⁻³

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

10.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{777,2 + 753,6}{2} = 765,40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.1)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 765,40}{273,15} \right) \quad (10.2)$$

$$O_{SP} = 81,95 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C = 2,96 \cdot 3,28 = 9,71 \text{ m}^2 \quad (10.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{81,95}{9,71} = 8,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10.4)$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 117 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,087 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,486 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 117 \cdot 10^{-6} = 119,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (10.5)$$

$M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{765,40 + 273,15} \right) = 0,316 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.6)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{119,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,486 \cdot 0,316 \cdot 1000}{0,087} \cdot 1,05 = 0,676 \quad (10.7)$$

$M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P3

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 9,71}{12,48} = 3,11 \text{ m} \quad (10.8)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin}, \quad C_l = 1, \quad C_m = 1$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (10.9)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,087}{4,763} \cdot \left(\frac{8,44 \cdot 4,763}{119,3 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,676^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 10,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

10.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{24,27}{32,21} = 2,713 \quad (10.10)$$

F_{st} a V je povrch a objem sálového prostoru

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (10.11)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (10.12)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 765,40 + 273,15 = 1038,55 \text{ °C} \quad (10.13)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (10.14)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 2,713}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1038,55}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 2,321 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 1,656 \cdot 0,1 \cdot 2,71 = 0,6291 \quad (10.15)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,629} = 0,4669 \quad (10.16)$$

Teplota povrchu nánosu na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (10.17)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (10.18)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,4669 \cdot 1038,55^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{1038,55}\right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{1038,55}}$$

$$\alpha_{sál} = 55,40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

10.1.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{466,06 - 442,46}{\ln \frac{466,06}{442,46}} = 454,16 \text{ °C} \quad (10.19)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (777,20 - 311,14) = 466,06 \text{ °C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (753,60 - 311,14) = 442,46 \text{ °C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 10,33 + 55,40 = 65,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.20)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 65,73 = 55,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.21)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti za mříží

$$S = 2 \cdot A \cdot B + C \cdot (B' + A') - F_{průlezu} \quad (10.22)$$

$$S = 2 \cdot 2,5 \cdot 2,96 + 3,28 \cdot (2,98 + 2,38) - 0,503 = 32,21 \text{ m}^2$$

$$F_{průlezu} = 0,503 \text{ m}^2 \text{ (plocha průlezu)}$$

změna rozměrů kvůli zešíkmení stropní části $\rightarrow A' = 2,38 \text{ m}, B' = 2,98 \text{ m}$

Přijatý tepelný výkon v oblasti za mříží

$$Q_{ZaM}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{55,87 \cdot 32,21 \cdot 454,16}{1000} = 817,19 \text{ kW} \quad (10.23)$$

10.2 Tepelná bilance v oblasti za mříží

Celkové přijaté teplo v oblasti za mříží

$$Q_{ZaM}^{Celk} = Q_{Mříž}^{Skut} = 817,19 \text{ kW} \quad (10.24)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti za mříží

$$Q_{ZaM}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (12918,10 - 12491,13) \quad (10.25)$$

$$Q_{ZaM}^b = 818,04 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{ZaM}^b - Q_{ZaM}^{Celk}}{Q_{ZaM}^b} \cdot 100 = \frac{818,04 - 817,19}{818,04} \cdot 100 = 0,11 \% \quad (10.26)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

11 Oblast přehříváku P1

Přehřívák P1 nachází v druhém tahu kotle nad ekonomizérem 2. Dominantní výhřevnou plochou je příčně obtékáný přehřívák P1 a dodatkovou výhřevnou plochou je výparník v podobě membránové stěny spalínového kanálu.

Přehřívák je tvořen 38 dvouhady ve vystřídaném uspořádání a způsob uchycení je pomocí háčků navařených na membránové stěně a provlečených mezi trubkami jednotlivých hadů.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 1,05 \text{ m}$

Šířka $B = 2,96 \text{ m}$

Hloubka $C = 3,28 \text{ m}$

11.1 Přehřívák P1

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,038 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,03 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,004 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,17 \text{ m}$

Počet řad příčně $z_1 = 38$

Podélná rozteč $s_2 = 0,0729 \text{ m}$

Počet řad podélně $z_2 = 4$

Střední délka hadů $l_h = 2,85 \text{ m}$

Počet hadů $x = 2$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 316,83 \text{ °C}$

Tlak $p_{Mi} = 9,92 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 352,80 \text{ °C}$

Tlak $p_{Mo} = 9,72 \text{ MPa}$

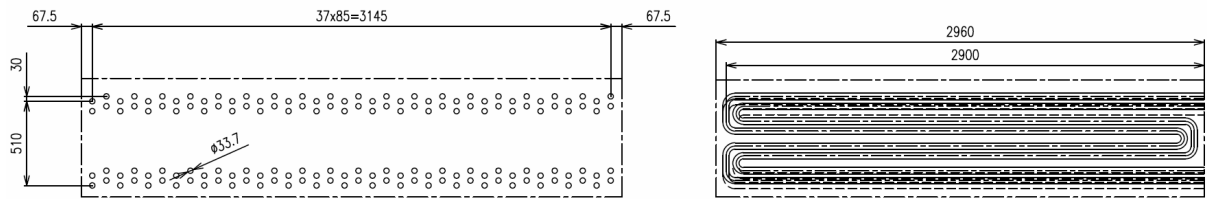
Parametry spalin

Vstup Teplota $t_{SPi} = 753,60 \text{ °C}$

Entalpie $I_{SPi} = 12491,13 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Výstup Teplota $t_{SPO} = 634,50 \text{ °C}$

Entalpie $I_{SPO} = 10357,87 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 11-1 Schéma přehříváku P1

11.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Sřední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{352,80 + 316,83}{2} = 334,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.1)$$

Sřední tlak páry

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{9,72 + 9,92}{2} = 9,82 \text{ MPa} \quad (11.2)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,021525 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \right) \cdot 38 \cdot 2 = 0,0269 \text{ m}^2 \quad (11.3)$$

Rychlost páry

$$w_P = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,021525}{0,0269} = 17,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11.4)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

Součinitel dynamické viskozity $\eta = 276 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 5,94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 74,5 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 2,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{276 \cdot 10^{-7} \cdot 2,45 \cdot 1000}{74,5 \cdot 10^{-3}} = 0,908 \quad (11.5)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1 \text{ pro ohřívání páry}, \quad C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

$$\text{Ekvivalentní průměr} \quad d_e = d = 0,03 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (11.6)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{74,5 \cdot 10^{-3}}{0,03} \cdot \left(\frac{17,81 \cdot 0,03}{5,94 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,907^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 3184,47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

11.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Střední teplota spalín

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{634,50 + 753,60}{2} = 694,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.7)$$

Objemový průtok spalín

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 694,05}{273,15} \right) \quad (11.8)$$

$$O_{SP} = 76,32 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_h = 2,96 \cdot 3,28 - 38 \cdot 0,038 \cdot 2,85 = 5,593 \text{ m}^2 \quad (11.9)$$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{76,32}{5,593} = 13,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11.10)$$

Určení podélné rozteče

$$s_2 = \frac{3 \cdot 0,09 + 4 \cdot 0,06}{7} = 0,0729 \text{ m} \quad (11.11)$$

3 mezery s roztečí 0,09 m a 4 mezery s roztečí 0,06 m

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,474 \quad (11.12)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0729}{0,038} = 1,917 \quad (11.13)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 4,474^2 + 1,917^2} = 2,946 \quad (11.14)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,474 - 1}{2,946 - 1} = 1,785 \quad (11.15)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku [1]

$$C_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,785^{0,1} = 0,386 \quad (11.16)$$

pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a $\sigma_l \geq 3$

$$C_z = 4 \cdot z_2^{0,02} - 3,2 = 4 \cdot 4^{0,02} - 3,2 = 0,912 \quad (11.17)$$

pro $z_2 < 10$ a $\sigma_l \geq 3$ **Vlastnosti spalin pro střední teplotu**Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 104,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0814 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,472 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 104,5 \cdot 10^{-6} = 106,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (11.18)$$

 $M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{694,05 + 273,15} \right) = 0,339 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (11.19)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{104,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,472 \cdot 0,339 \cdot 1000}{0,0814} \cdot 1,05 = 0,686 \quad (11.20)$$

 $M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.21)$$

$$\alpha_k = 0,912 \cdot 0,386 \cdot \frac{0,081}{0,038} \cdot \left(\frac{13,64 \cdot 0,038}{106,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,686^{0,33} = 108,63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

11.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,0729}{0,038^2} - 1 \right) = 0,339 \quad (11.22)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (11.23)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (11.24)$$

Absolutní teplota spalín

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 694,05 + 273,15 = 967,20 \text{ °C} \quad (11.25)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (11.26)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,339}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{967,20}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 6,214 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 6,214 \cdot 0,1 \cdot 0,339 = 0,2108 \quad (11.27)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,211} = 0,1901 \quad (11.28)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 334,81 + 25 + 273,15 = 632,96 \text{ K} \quad (11.29)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (11.30)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1901 \cdot 967,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{632,96}{967,2}\right)^{3,6}}{1 - \frac{632,96}{967,2}}$$

$$\alpha_{Sál} = 19,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

11.1.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon přehříváku

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{400,80 - 317,63}{\ln \frac{400,80}{317,63}} = 357,63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.31)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (753,60 - 352,80) = 400,80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (634,50 - 316,83) = 317,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{Sál} = 108,63 + 19,98 = 128,62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.32)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\Psi \cdot \alpha_{SP}}{1 + \frac{\alpha_{SP}}{\alpha_P}} = \frac{0,85 \cdot 128,62}{1 + \frac{128,62}{3184,47}} = 105,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.33)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha přehříváku

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 38 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2,85 = 103,43 \text{ m}^2 \quad (11.34)$$

Potřebná (ideální) plocha přehříváku

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{P1}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 3907,3}{105,08 \cdot 357,63} = 103,97 \text{ m}^2 \quad (11.35)$$

Odchylka skutečné plochy přehříváku od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{103,43 - 103,97}{103,97} \cdot 100 = -0,52 \% \quad (11.36)$$

Přijatý tepelný výkon přehřívačem

$$Q_{P1}^{skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{105,08 \cdot 103,43 \cdot 357,63}{1000} = 3887,0 \text{ kW} \quad (11.37)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je -0,52%, co je zanedbatelná hodnota.

11.2 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0603 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,0503 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,005 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,08 \text{ m}$

Délka trubek $l = 1,05 \text{ m}$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

11.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Vstupní a výstupní teploty spalin, průtočný průřez spalin a rychlost proudu spalin je shodná pro celou oblast přehřívačku P1 a je již vypočtená v předchozí kapitole.

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P1

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 5,593}{231,968} = 0,096 \text{ m} \quad (11.38)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin}, \quad C_l = 1, \quad C_m = 1 \quad (11.39)$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 106,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0814 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6859$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (11.40)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0814}{0,096} \cdot \left(\frac{13,64 \cdot 0,096}{106,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6859^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 31,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

11.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Hodnota optické hustoty spalin a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast přehřívačku P1 a je vypočtená v předchozí kapitole.

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 0,2108 \quad (11.41)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 0,1901 \quad (11.42)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (11.43)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (11.44)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1901 \cdot 967,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{967,2} \right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{967,2}}$$

$$\alpha_{sál} = 19,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$ **11.2.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny**

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{442,46 - 323,36}{\ln \frac{442,46}{323,36}} = 379,80 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.45)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (753,60 - 311,14) = 442,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (634,50 - 311,14) = 323,36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 31,32 + 19,33 = 50,65 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (11.46)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 50,65 = 43,05 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (11.47)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti přehříváku P1

$$S = 2 \cdot C \cdot (B + C) - F_{průlezu} = 2 \cdot 1,05 \cdot (2,96 \cdot 3,28) - 0,25 = 12,85 \text{ } m^2 \quad (11.48)$$

$$F_{průlezu} = 0,25 \text{ } m^2 \text{ (půlka průlezu)}$$

Přijatý tepelný výkon membránovou stěnou

$$Q_{P1}^{Memb} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{43,05 \cdot 12,85 \cdot 379,80}{1000} = 210,14 \text{ } kW \quad (11.49)$$

11.3 Tepelná bilance v oblasti P1

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti přehříváku P1

$$Q_{P1}^{Celk} = Q_{P1}^{Skut} + Q_{P1}^{Memb} = 3887 + 210,14 = 4097,14 \text{ } kW \quad (11.50)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti přehříváku P1

$$Q_{P1}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (12491,13 - 10357,87) \quad (11.51)$$

$$Q_{P1}^b = 4087,13 \text{ } kW$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{P2}^b - Q_{P2}^{Celk}}{Q_{P2}^b} \cdot 100 = \frac{4087,13 - 4097,14}{4087,13} \cdot 100 = -0,24 \text{ } \% \quad (11.52)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

12 Oblast ekonomizéru 2

Ekonomizér 2 je poslední výhřevnou plochou v rámci těla kotle. Jedná se o příčně obtékaný výměník tvořený 59 střídavě uspořádanými dvouhady. Trubky jsou hladké a dodatkovou plochou je část výparníku v podobě membránových stěn spalínového kanálu. Z ekonomizéru 2 proudí horká voda do bubnu.

Rozměry počítané oblasti

Výška	$A = 1,9 \text{ m}$
Šířka	$B = 2,96 \text{ m}$
Hloubka	$C = 3,28 \text{ m}$

12.1 Ekonomizér 2

Základní parametry

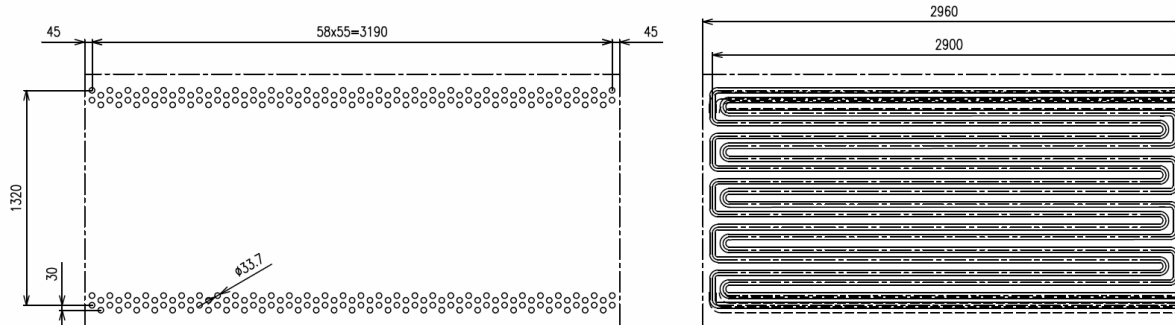
Vnější průměr	$D = 0,0337 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0237 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,11 \text{ m}$
Počet řad příčně	$z_1 = 59$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,0695 \text{ m}$
Počet řad podélně	$z_2 = 10$
Střední délka hadů	$l_h = 2,876 \text{ m}$
Počet hadů	$x = 2$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 206,10 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,17 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 289,80 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Parametry spalin

Vstup	Teplota	$t_{SPi} = 634,50 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPi} = 10357,87 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Výstup	Teplota	$t_{SPo} = 357,30 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPo} = 5634,23 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 11-1 Schéma přehříváku P1

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

Střední teplota vody

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{289,80 + 206,10}{2} = 247,95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.1)$$

Střední tlak vody

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{10,02 + 10,17}{2} = 10,095 \text{ MPa} \quad (12.2)$$

Měrný objem vody pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,001236 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,0237^2}{4} \right) \cdot 59 \cdot 2 = 0,0251 \text{ m}^2 \quad (12.3)$$

Rychlost vody

$$w_P = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,001236}{0,0251} = 1,09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.4)$$

12.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{357,30 + 634,50}{2} = 495,90 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.5)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 495,90}{273,15} \right) \quad (12.6)$$

$$O_{SP} = 60,69 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_h = 2,96 \cdot 3,28 - 59 \cdot 0,038 \cdot 2,825 = 4,28 \text{ m}^2 \quad (12.7)$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{60,69}{4,28} = 14,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.8)$$

Určení podélné rozteče

$$s_2 = \frac{9 \cdot 0,08 + 10 \cdot 0,06}{19} = 0,0695 \text{ m} \quad (12.9)$$

9 mezery s roztečí 0,08 m a 10 mezery s roztečí 0,06 m

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,11}{0,0337} = 3,264 \quad (12.10)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0695}{0,0337} = 2,062 \quad (12.11)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 3,264^2 + 2,062^2} = 2,629 \quad (12.12)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{3,264 - 1}{2,629 - 1} = 1,390 \quad (12.13)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku [1]

$$C_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,390^{0,1} = 0,355 \quad (12.14)$$

pro $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$

$$C_z = 1$$

pro $z_2 \geq 10$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

$$\text{Součinitel kinematické viskozity} \quad \nu' = 71 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti} \quad \lambda = 0,0643 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Měrná tepelná kapacita} \quad c_p = 1,436 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 71 \cdot 10^{-6} = 72,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.15)$$

 $M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{495,90 + 273,15} \right) = 0,426 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (12.16)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{72,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,436 \cdot 0,426 \cdot 1000}{0,0643} \cdot 1,05 = 0,7238 \quad (12.17)$$

 $M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient**Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)**

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (12.18)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,355 \cdot \frac{0,0643}{0,0337} \cdot \left(\frac{14,17 \cdot 0,0337}{72,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,7238^{0,33} = 121,36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

12.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,0695}{0,0337^2} - 1 \right) = 0,230 \quad (12.19)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (12.20)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (12.21)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 495,90 + 273,15 = 769,05 \text{ °C} \quad (12.22)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (12.23)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,230}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{769,05}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 8,462 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 8,462 \cdot 0,1 \cdot 0,230 = 0,1942 \quad (12.24)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,194} = 0,1765 \quad (12.25)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 247,95 + 25 + 273,15 = 546,10 \text{ K} \quad (12.26)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (12.27)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1765 \cdot 769,05^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{546,10}{769,05}\right)^{3,6}}{1 - \frac{546,10}{769,05}}$$

$$\alpha_{Sál} = 10,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

12.1.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ekonomizéru

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{344,70 - 151,20}{\ln \frac{344,70}{151,20}} = 234,81 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.28)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (634,50 - 289,80) = 344,70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (357,30 - 206,10) = 151,20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{Sál} = 121,36 + 10,07 = 131,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.29)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 131,74 = 111,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.30)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha ekonomizéru 2

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,0337 \cdot 59 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 2,876 = 341,03 \text{ m}^2 \quad (12.31)$$

Potřebná (ideální) plocha ekonomizéru 2

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{Eko2}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 8965,63}{111,71 \cdot 234,81} = 341,79 \text{ m}^2 \quad (12.32)$$

Odchylka skutečné plochy ekonomizéru 2 od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{341,03 - 341,79}{341,79} \cdot 100 = -0,22 \% \quad (12.33)$$

Přijatý tepelný výkon ekonomizéru 2

$$Q_{Eko2}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{111,71 \cdot 341,03 \cdot 234,81}{1000} = 8945,6 \text{ kW} \quad (12.34)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je -0,22%, co je zanedbatelná hodnota.

12.2 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0603 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,0503 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,005 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,08 \text{ m}$

Délka trubek $l = 1,9 \text{ m}$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vody neuvažujeme

12.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Vstupní a výstupní teploty spalin, průtočný průřez spalin a rychlost proudu spalin je shodná pro celou oblast ekonomizéru 2 a je již vypočtená v předchozí kapitole.

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti P1

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 4,28}{338,366} = 0,051 \text{ m} \quad (12.35)$$

O je obvod průřezu kanálu

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin}, \quad C_l = 1, \quad C_m = 1$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

$$\text{Součinitel kinematické viskozity} \quad \nu = 72,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti} \quad \lambda = 0,0643 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr = 0,7238$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (12.36)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0643}{0,051} \cdot \left(\frac{14,17 \cdot 0,051}{72,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,7238^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 40,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

12.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Hodnota optické hustoty spalin a tedy i stupeň černosti proudu je shodný pro celou oblast ekonomizéru 2 a je vypočtená v předchozí kapitole.

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 0,1942 \quad (12.37)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 0,1765 \quad (12.38)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (12.39)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (12.40)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1765 \cdot 769,05^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{769,05}\right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{769,05}}$$

$$\alpha_{Sál} = 11,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

12.2.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{323,36 - 46,16}{\ln \frac{323,36}{46,16}} = 142,40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.41)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (634,50 - 311,14) = 323,36 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (357,3 - 311,14) = 46,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{Sál} = 40,39 + 11,25 = 51,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.42)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 51,64 = 43,90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.43)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti ekonomizéru 2

$$S = 2 \cdot C \cdot (B + C) - F_{průlezu} = 2 \cdot 1,9 \cdot (2,96 \cdot 3,28) - 0,25 = 23,46 \text{ m}^2 \quad (12.44)$$

$$F_{průlezu} = 0,25 \text{ m}^2 \text{ (půlka průlezu)}$$

Přijatý tepelný výkon membránovou stěnou

$$Q_{Eko2}^{Mem} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{43,90 \cdot 23,46 \cdot 142,40}{1000} = 146,65 \text{ kW} \quad (12.45)$$

12.3 Tepelná bilance v oblasti ekonomizéru 2

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti ekonomizéru 2

$$Q_{Eko2}^{Celk} = Q_{Eko2}^{Skut} + Q_{Eko2}^{Memb} = 8945,55 + 146,65 = 9092,20 \text{ kW} \quad (12.46)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti ekonomizéru 2

$$Q_{Eko2}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (10357,87 - 5634,23) \quad (12.47)$$

$$Q_{Eko2}^b = 9050,11 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{Eko2}^b - Q_{Eko2}^{Celk}}{Q_{Eko2}^b} \cdot 100 = \frac{9050,11 - 9092,20}{9050,11} \cdot 100 = -0,46 \% \quad (12.48)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

13 Oblast výstupu z kotle

Oblast se nachází v druhém tahu kotle za ekonomizérem 2. Jedná se o část výparníku v podobě membránových stěn spalinového kanálu.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 1,25 \text{ m}$

Šířka $B = 2,96 \text{ m}$

Hloubka $C = 3,28 \text{ m}$

13.1 Membránová stěna

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,0603 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,0503 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,005 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,08 \text{ m}$

Parametry média

Vstup Teplota $t_{Mi} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mi} = 10,02 \text{ MPa}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak $p_{Mo} = 10,02 \text{ MPa}$

Parametry spalin

Vstup Teplota $t_{SPi} = 357,30 \text{ }^\circ\text{C}$

Entalpie $I_{SPi} = 5634,23 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Výstup Teplota $t_{SPo} = 356,27 \text{ }^\circ\text{C}$

Entalpie $I_{SPo} = 5617,29 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry neuvažujeme

13.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{356,27 + 357,30}{2} = 356,79 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.1)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 356,79}{273,15} \right) \quad (13.2)$$

$$O_{SP} = 49,71 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = A \cdot C = 1,2 \cdot 3,28 = 3,936 \text{ m}^2 \quad (13.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{49,71}{3,936} = 12,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13.4)$$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

$$\text{Součinitel kinematické viskozity} \quad \nu' = 56,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti} \quad \lambda = 0,063,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Měrná tepelná kapacita} \quad c_p = 1,420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 56,2 \cdot 10^{-6} = 57,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (13.5)$$

$$M_\nu = 1,02 \text{ je opravný koeficient}$$

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{356,79 + 273,15} \right) = 0,520 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (13.6)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{57,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,420 \cdot 0,520 \cdot 1000}{0,0633} \cdot 1,05 = 0,703 \quad (13.7)$$

$$M_{Pr} = 1,05 \text{ je opravný koeficient}$$

Ekvivalentní průměr spalinového kanálu v oblasti výstupu z kotle

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 3,936}{12,48} = 1,262 \text{ m} \quad (13.8)$$

$$O \text{ je obvod průřezu kanálu}$$

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = 1 \text{ pro ochlazování spalin}, \quad C_l = 1, \quad C_m = 1$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (13.9)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0633}{1,262} \cdot \left(\frac{12,63 \cdot 1,262}{57,3 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,703^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 17,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

13.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{12,14}{11,5} = 3,799 \quad (13.10)$$

F_{st} a *V* je povrch a objem sálavého prostoru

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (13.11)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (13.12)$$

Absolutní teplota spalín

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 356,79 + 273,15 = 629,94 \text{ °C} \quad (13.13)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (13.14)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 3,8}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{629,94}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 2,062 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 2,062 \cdot 0,1 \cdot 3,8 = 0,7835 \quad (13.15)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,784} = 0,5432 \quad (13.16)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 311,14 + 25 + 273,15 = 609,29 \text{ K} \quad (13.17)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ **Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (13.18)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,5432 \cdot 629,94^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{609,29}{629,94}\right)^{3,6}}{1 - \frac{609,29}{629,94}}$$

$$\alpha_{sál} = 24,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$ **13.1.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon membránové stěny**

Střední logaritmický teplotní spád (výparník)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{46,16 - 45,13}{\ln \frac{46,16}{45,13}} = 45,64 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13.19)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (357,30 - 311,14) = 46,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (356,27 - 311,14) = 45,13 \text{ }^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 17,13 + 24,03 = 41,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.20)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 41,15 = 34,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.21)$$

součinitel tepelné efektivnosti $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha membránové stěny v oblasti výstupu z kotle

$$S = 20,19 \text{ m}^2 \quad (13.22)$$

určení velikosti plochy jsem provedl pomocí programu AutoCAD

Přijatý tepelný výkon výparníkem

$$Q_{Vys}^{skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{34,98 \cdot 20,19 \cdot 45,64}{1000} = 32,24 \text{ kW} \quad (13.23)$$

13.2 Tepelná bilance v oblasti výstupu z kotle

Celkové přijaté teplo membránovou stěnou

$$Q_{Výs}^{Celk} = Q_{Výs}^{Skut} = 32,24 \text{ kW} \quad (13.24)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti výstupu z kotle

$$Q_{Výs}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (5634,23 - 5617,29) \quad (13.25)$$

$$Q_{Výs}^b = 32,45 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{Výs}^b - Q_{Výs}^{Celk}}{Q_{Výs}^b} \cdot 100 = \frac{32,45 - 32,24}{32,45} \cdot 100 = 0,65 \% \quad (13.26)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

14 Oblast ekonomizéru 1

Ekonomizér 1 se již nenachází v kotli, ale v prodlouženém druhém tahu. Jedná se o příčně obtékaný výměník tvořený 77 střídavě uspořádanými dvouhady. Trubky jsou hladké. Z ekonomizéru 1 proudí voda rovnou do ekonomizéru 2.

Rozměry počítané oblasti

Výška	$A = 3,44 \text{ m}$
Šířka	$B = 3 \text{ m}$
Hloubka	$C = 3,5 \text{ m}$

14.1 Ekonomizér 1

Základní parametry

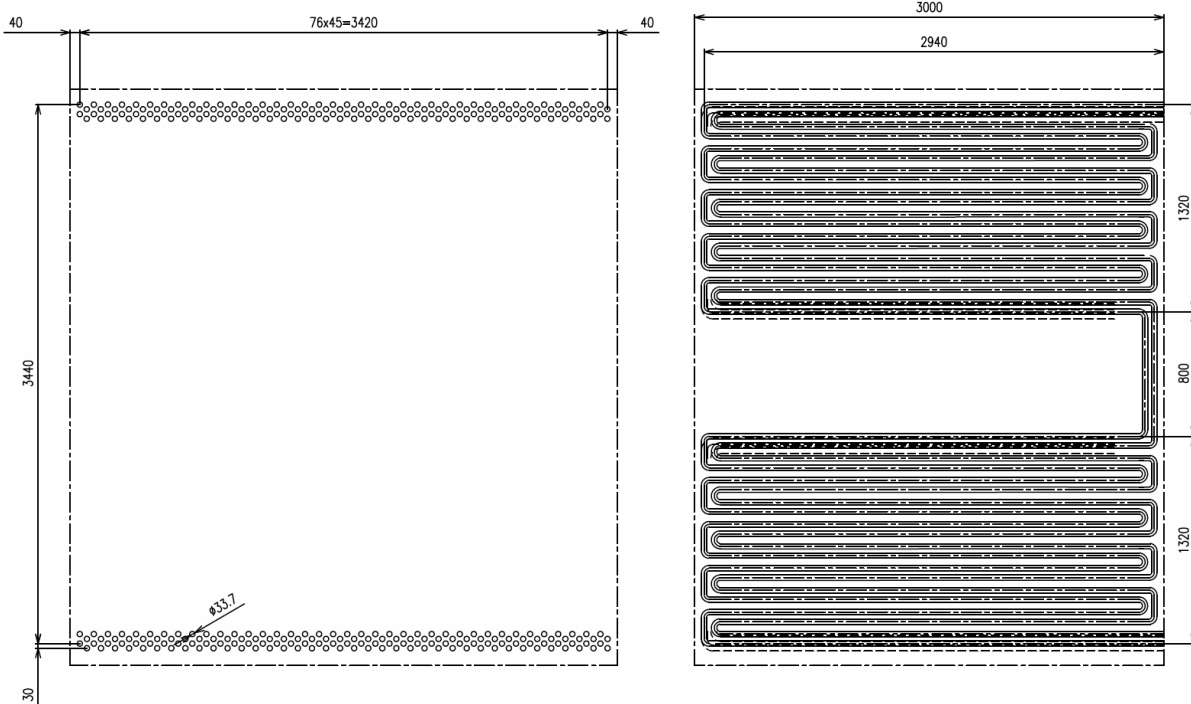
Vnější průměr	$D = 0,0337 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,0237 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,09 \text{ m}$
Počet řad příčně	$z_1 = 77$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,0697 \text{ m}$
Počet řad podélně	$z_2 = 20$
Střední délka hadů	$l_h = 2,9 \text{ m}$
Počet hadů	$x = 2$

Parametry média

Vstup	Teplota	$t_{Mi} = 142,00 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mi} = 10,32 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Mo} = 206,10 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Mo} = 10,17 \text{ MPa}$

Parametry spalin

Vstup	Teplota	$t_{SPi} = 357,30 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPi} = 5634,23 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Výstup	Teplota	$t_{SPo} = 156,10 \text{ }^\circ\text{C}$
	Entalpie	$I_{SPo} = 2406,98 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 14-1 Schéma Ekonomizéru 1

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vody neuvažujeme

Střední teplota vody

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{206,10 + 142,00}{2} = 174,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.1)$$

Střední tlak vody

$$p_M^{stř} = \frac{p_{Mo} + p_{Mi}}{2} = \frac{10,17 + 10,32}{2} = 10,245 \text{ MPa} \quad (14.2)$$

Měrný objem vody pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_M^{stř} = 0,001112 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,0237^2}{4} \right) \cdot 77 \cdot 2 = 0,034 \text{ m}^2 \quad (14.3)$$

Rychlost vody

$$w_P = \frac{M_{pp} \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,001112}{0,034} = 0,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14.4)$$

14.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Střední teplota spalín

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{356,27 + 156,10}{2} = 256,19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.5)$$

Objemový průtok spalín

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 256,19}{273,15} \right) \quad (14.6)$$
$$O_{SP} = 41,77 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_h = 3 \cdot 3,5 - 77 \cdot 0,0337 \cdot 2,938 = 2,88 \text{ m}^2 \quad (14.7)$$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{41,77}{2,88} = 14,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14.8)$$

Určení podélné rozteče

$$s_2 = \frac{17 \cdot 0,08 + 18 \cdot 0,06}{35} = 0,0695 \text{ m} \quad (14.9)$$

17 mezery s roztečí 0,08 m a 18 mezery s roztečí 0,06 m

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,0337} = 2,671 \quad (14.10)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0697}{0,0337} = 2,069 \quad (14.11)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 2,671^2 + 2,069^2} = 2,462 \quad (14.12)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2,671 - 1}{2,462 - 1} = 1,143 \quad (14.13)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku [1]

$$C_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,143^{0,1} = 0,3505 \quad (14.14)$$

pro $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$

$$C_z = 1$$

pro $z_2 \geq 10$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0464 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,398 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 38 \cdot 10^{-6} = 38,76 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (14.15)$$

$M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{\text{stř}} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{256,19 + 273,15} \right) = 0,619 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (14.16)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{38,76 \cdot 10^{-6} \cdot 1,398 \cdot 0,619 \cdot 1000}{0,0464} \cdot 1,05 = 0,7593 \quad (14.17)$$

$M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (14.18)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,351 \cdot \frac{0,0464}{0,0337} \cdot \left(\frac{14,52 \cdot 0,0337}{38,76 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,7593^{0,33} = 127,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

14.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,0697}{0,0337^2} - 1 \right) = 0,183 \quad (14.19)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (14.20)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (14.21)$$

Absolutní teplota spalin

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 256,19 + 273,15 = 529,34 \text{ °C} \quad (14.22)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (14.23)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,183}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{529,34}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 10,679 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 10,679 \cdot 0,1 \cdot 0,183 = 0,1955 \quad (14.24)$$

Stupeň černosti spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,196} = 0,1775 \quad (14.25)$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 174,05 + 25 + 273,15 = 472,20 \text{ K} \quad (14.26)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (14.27)$$

$$\alpha_{Sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1775 \cdot 529,34^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{472,20}{529,34}\right)^{3,6}}{1 - \frac{472,20}{529,34}}$$

$$\alpha_{Sál} = 4,22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$ **14.1.3 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ekonomizéru**

Střední logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{150,17 - 14,10}{\ln \frac{150,17}{14,10}} = 57,52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14.28)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPi} - t_{Mi}) = (356,27 - 206,10) = 150,17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPo} - t_{Mo}) = (156,10 - 142,00) = 14,10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 127,33 + 4,22 = 131,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (14.29)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{SP} = 0,85 \cdot 127,33 = 111,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (14.30)$$

součinitel tepelné efektivity $\Psi = 0,85$

Skutečná plocha ekonomizéru 1

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,0337 \cdot 77 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 2,938 = 958,04 \text{ m}^2 \quad (14.31)$$

Potřebná (ideální) plocha ekonomizéru 1

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{Eko1}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 6199,58}{111,82 \cdot 57,52} = 963,92 \text{ m}^2 \quad (14.32)$$

Odchylka skutečné plochy ekonomizéru 1 od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{958,04 - 963,92}{963,92} \cdot 100 = -0,61 \% \quad (14.33)$$

Přijatý tepelný výkon ekonomizéru 1

$$Q_{Eko1}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{111,82 \cdot 958,04 \cdot 57,52}{1000} = 6161,75 \text{ kW} \quad (14.34)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je -0,61%, co je zanedbatelná hodnota.

14.2 Tepelná bilance v oblasti ekonomizéru 1

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti ekonomizéru 1

$$Q_{Eko1}^{Celk} = Q_{Eko1}^{Skut} = 6161,75 \text{ kW} \quad (14.35)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti ekonomizéru 1

$$Q_{Eko1}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (5617,29 - 2406,98) \quad (14.36)$$

$$Q_{Eko1}^b = 6150,68 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{Eko1}^b - Q_{Eko1}^{celk}}{Q_{Eko1}^b} \cdot 100 = \frac{6150,68 - 6161,75}{6150,68} \cdot 100 = -0,18 \% \quad (14.37)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

15 Oblast ohříváku vzduchu

Ohřívák vzduchu je poslední výhřevnou plochou předtím než spaliny odchází do komínu. Jedná se o trubkové provedení výměníku, kde v trubkách proudí vzduch spaliny okolo nich. Vzduch se ohřívá z teploty 50 °C na 100 °C. Vyšší ohřátí spalovacího vzduchu nemá pozitivní vliv na emise (tvoří se NO_x). Ohřátím vzduchu se zvýší účinnost celého kotle.

Rozměry počítané oblasti

Výška $A = 2,08 \text{ m}$

Šířka $B = 3 \text{ m}$

Hloubka $C = 3,5 \text{ m}$

15.1 Ohřívák vzduchu

Základní parametry

Vnější průměr $D = 0,038 \text{ m}$

Vnitřní průměr $d = 0,034 \text{ m}$

Tloušťka stěny $s = 0,002 \text{ m}$

Příčná rozteč $s_1 = 0,06 \text{ m}$

Počet řad příčně $z_1 = 49$

Podélná rozteč $s_2 = 0,04 \text{ m}$

Počet řad podélně $z_2 = 52$

Délka trubky $l_t = 3,5 \text{ m}$

Počet trubek $n = 2548$

Parametry ohřívání vzduchu

Vstup Teplota $t_{Mi} = 50,00 \text{ °C}$

Výstup Teplota $t_{Mo} = 100,00 \text{ °C}$

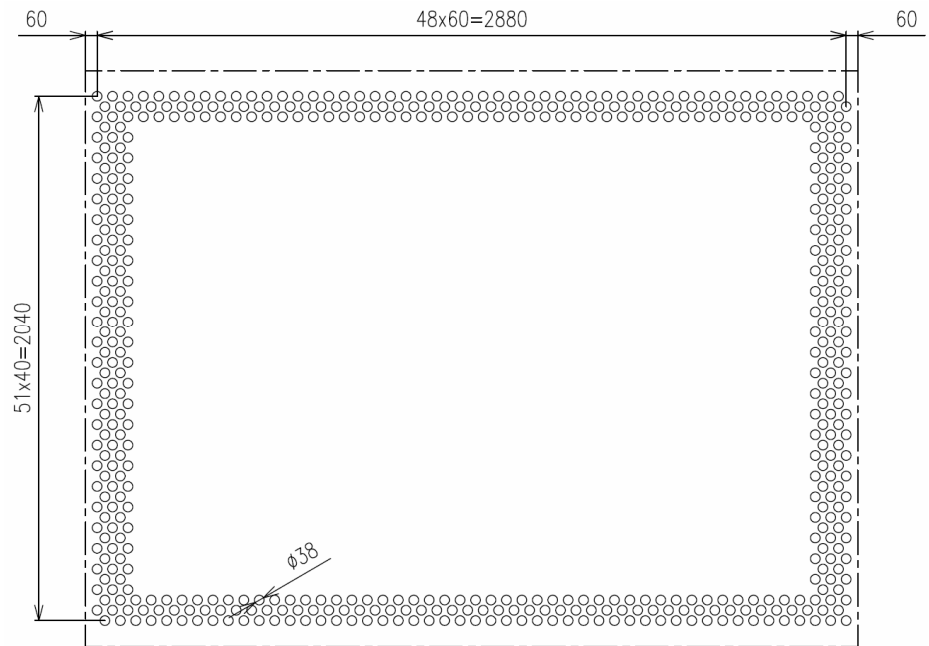
Parametry spalin

Vstup Teplota $t_{SPi} = 156,10 \text{ °C}$

Entalpie $I_{SPi} = 2406,98 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Výstup Teplota $t_{SPO} = 112,60 \text{ °C}$

Entalpie $I_{SPO} = 1728,85 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 15-1 Schéma OVZ

15.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

Střední teplota vzduchu

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Mo} + t_{Mi}}{2} = \frac{100,00 + 50,00}{2} = 75,00 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15.1)$$

Množství přiváděného vzduchu

$$O_{VZ}^{OVZ} = M_{pv} \cdot O_{VZ} \cdot \left(\frac{273,15 + t_M^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 10,1628 \cdot \left(\frac{273,15 + 75}{273,15} \right) \quad (15.2)$$

$$O_{VZ}^{OVZ} = 25,00 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro vzduch

$$F_{VZ} = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot n = \left(\frac{3,14 \cdot 0,034^2}{4} \right) \cdot 2548 = 2,313 \text{ m}^2 \quad (15.3)$$

Rychlost vzduchu

$$w_{VZ} = \frac{O_{VZ}^{OVZ}}{F_{VZ}} = \frac{25,00}{2,313} = 10,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15.4)$$

Vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

Prandtlovo číslo $Pr = 0,686$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,322 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Opravné koeficienty podle [1]

$$C_t = \left(\frac{T}{T_{st}} \right)^{0,5} = \left(\frac{75 + 273,15}{100 + 273,15} \right)^{0,5} = 0,966 \quad (15.5)$$

T je teplota proudu vzduchu a T_{st} je teplota stěny

$$C_l = 1$$

$$C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr $d_e = d = 0,034 \text{ m}$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_V = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{W \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (15.6)$$

$$\alpha_V = 0,023 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-2}}{0,034} \cdot \left(\frac{10,81 \cdot 0,034}{2,07 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,608^{0,4} \cdot 0,966 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_V = 40,29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

15.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Střední teplota spalin

$$t_{SP}^{stř} = \frac{t_{SPo} + t_{SPi}}{2} = \frac{112,60 + 156,10}{2} = 134,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15.7)$$

Objemový průtok spalin

$$O_{SP} = M_{pv} \cdot O_{SP}^V \cdot \left(\frac{273,15 + t_{SP}^{stř}}{273,15} \right) = 1,931 \cdot 11,163 \cdot \left(\frac{273,15 + 134,35}{273,15} \right) \quad (15.8)$$

$$O_{SP} = 32,16 \text{ m}^3$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F_{SP} = B \cdot C - z_1 \cdot D \cdot l_t = 3 \cdot 3,5 - 49 \cdot 0,038 \cdot 3,5 = 3,983 \text{ m}^2 \quad (15.9)$$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{O_{SP}}{F_{SP}} = \frac{32,16}{3,983} = 8,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15.10)$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,06}{0,038} = 1,579 \quad (15.11)$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,04}{0,038} = 1,053 \quad (15.12)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 1,579^2 + 1,053^2} = 1,316 \quad (15.13)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,579 - 1}{1,053 - 1} = 1,833 \quad (15.14)$$

Korekční součinitel uspořádání svazku [1]

$$C_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 1,833^{0,5} = 0,372 \quad (15.15)$$

pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a $\sigma_1 < 3$

$$C_z = 1$$

pro $z_2 \geq 10$

Vlastnosti spalin pro střední teplotu

Součinitel kinematické viskozity $\nu' = 24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0349 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 1,378 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita

$$\nu = M_\nu \cdot \nu' = 1,02 \cdot 24 \cdot 10^{-6} = 24,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (15.16)$$

$M_\nu = 1,02$ je opravný koeficient

Hustota spalin

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273,15}{t_{SP}^{stř} + 273,15} \right) = 1,2 \cdot \left(\frac{273,15}{134,35 + 273,15} \right) = 0,804 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (15.17)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{v \cdot c_p \cdot \rho \cdot 1000}{\lambda} \cdot M_{Pr} = \frac{24,48 \cdot 10^{-6} \cdot 1,378 \cdot 0,804 \cdot 1000}{0,0349} \cdot 1,05 = 0,8164 \quad (15.18)$$

$M_{Pr} = 1,05$ je opravný koeficient

Součinitel přestupu tepla konvekcí (příčné obtékání)

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{v} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (15.19)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,372 \cdot \frac{0,0349}{0,038} \cdot \left(\frac{8,35 \cdot 0,038}{24,48 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,8164^{0,33}$$

$$\alpha_k = 93,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

15.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,06 \cdot 0,04}{0,038^2} - 1 \right) = 0,038 \quad (15.20)$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{SP} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,0901 + 0,1934 = 0,2835 \quad (15.21)$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2835 = 0,02835 \text{ MPa} \quad (15.22)$$

Absolutní teplota spalín

$$T_0 = t_{SP}^{stř} + 273,15 = 134,35 + 273,15 = 407,50 \text{ °C} \quad (15.23)$$

Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (15.24)$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1934}{3,16 \cdot \sqrt{0,02835 \cdot 0,038}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{407,50}{1000} \right) \cdot 0,2835$$

$$k_{SP} \cdot r_{SP} = 24,98 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_{SP} \cdot r_{SP} \cdot p \cdot s = 24,98 \cdot 0,1 \cdot 0,038 = 0,0954 \quad (15.25)$$

Stupeň černosti spalín

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - 2,718^{-0,095} = 0,0910 \quad (15.26)$$

Teplota povrchu nánosu na straně spalín

$$T_z = t_M^{stř} + \Delta t + 273,15 = 75 + 25 + 273,15 = 373,15 \text{ K} \quad (15.27)$$

pro plyn $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot \alpha \cdot T_0^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_0}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_0}} \quad (15.28)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,091 \cdot 407,50^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{373,15}{407,50}\right)^{3,6}}{1 - \frac{373,15}{407,50}}$$

$$\alpha_{sál} = 1,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

pro plyn $\alpha_{st} = 0,8$

15.1.4 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon ohříváku

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{62,60 - 56,10}{\ln \frac{62,60}{56,10}} = 59,29 \text{ }^\circ\text{C} \quad (15.29)$$

$$\Delta t_v = (t_{SPo} - t_{Mi}) = (112,60 - 50,00) = 62,60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{SPi} - t_{Mo}) = (156,10 - 100,00) = 56,10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Křížové proudění

$$P = \frac{\Delta t_m}{t_{SPi} - t_{Mi}} = \frac{56,10}{156,10 - 50} = 0,53 \quad (15.30)$$

$$R = \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = \frac{62,60}{56,10} = 1,12 \quad (15.31)$$

Pro hodnoty P, R a jednosmyčkové zapojení vyplývá z nomogramů podle [1] korekce na křížový proud $\Psi = 0,86$

Střední teplotní spád s korekcí na křížový proud

$$\Delta t = \Psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,86 \cdot 59,29 = 50,99 \text{ }^\circ\text{C} \quad (15.32)$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{SP} = \alpha_k + \alpha_{sál} = 93,88 + 1,02 = 94,90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (15.33)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_V \cdot \alpha_{SP}}{\alpha_V + \alpha_{SP}} = \frac{40,29 \cdot 94,90}{40,29 + 94,90} = 24,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (15.34)$$

součinitel tepelné efektivity $\xi = 0,85$

Skutečná plocha ohříváku

$$S = \pi \cdot D \cdot n \cdot l_t = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 2548 \cdot 3,5 = 1064,64 \text{ m}^2 \quad (15.35)$$

Potřebná (ideální) plocha ohříváku

$$S_{ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{OVZ}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 1310,28}{24,04 \cdot 50,99} = 1068,91 \text{ m}^2 \quad (15.36)$$

Odchylka skutečné plochy ohříváku od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{ideal}}{S_{ideal}} \cdot 100 = \frac{1064,64 - 1068,91}{1068,91} \cdot 100 = -0,40 \% \quad (15.37)$$

Přijatý tepelný výkon ohřívákem

$$Q_{OVZ}^{skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{24,04 \cdot 1064,64 \cdot 50,99}{1000} = 1305,04 \text{ kW} \quad (15.38)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je 0,40%, co je zanedbatelná hodnota.

15.2 Tepelná bilance v oblasti ohříváku vzduchu

Celkové přijaté teplo výhřevnými plochami v oblasti OVZ

$$Q_{OVZ}^{celk} = Q_{OVZ}^{skut} = 1305,04 \text{ kW} \quad (15.39)$$

Bilanční teplo spalin v oblasti OVZ

$$Q_{OVZ}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_{SPi} - I_{SPo}) = 1,931 \cdot 0,9923 \cdot (2406,98 - 1728,85) \quad (15.40)$$

$$Q_{OVZ}^b = 1299,24 \text{ kW}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_{OVZ}^b - Q_{OVZ}^{celk}}{Q_{OVZ}^b} \cdot 100 = \frac{1299,24 - 1305,04}{1299,24} \cdot 100 = -0,45 \% \quad (15.41)$$

Odchylka se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$, proto můžeme brát volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

16 Vstřík I

Vstřík I je umístěn ve směru prodění pracovního média mezi přehřívák P1 a P2. Reguluje tedy teplotu páry na vstupu do P2 a tedy i výstupní páru. Vstřík I je tvořen teplosměnnou plochou umístěnou v dolní části bubny, tedy pod vodou. Ochlazením páry dochází k předání tepla do výparníkové části kotle.

Výměník je tvořen 9 dvouhady uspořádanými nad sebou s minimální vertikální roztečí. Vstřík I je dimenzovaný na 50% průtok přehřáté páry. Regulace průtoku je prováděna pomocí ventilů. V případě potřeby snížení průtoku páry vstříkem začne většina páry proudit tzv. bypasssem rovnou do přehříváku P2.

Základní parametry

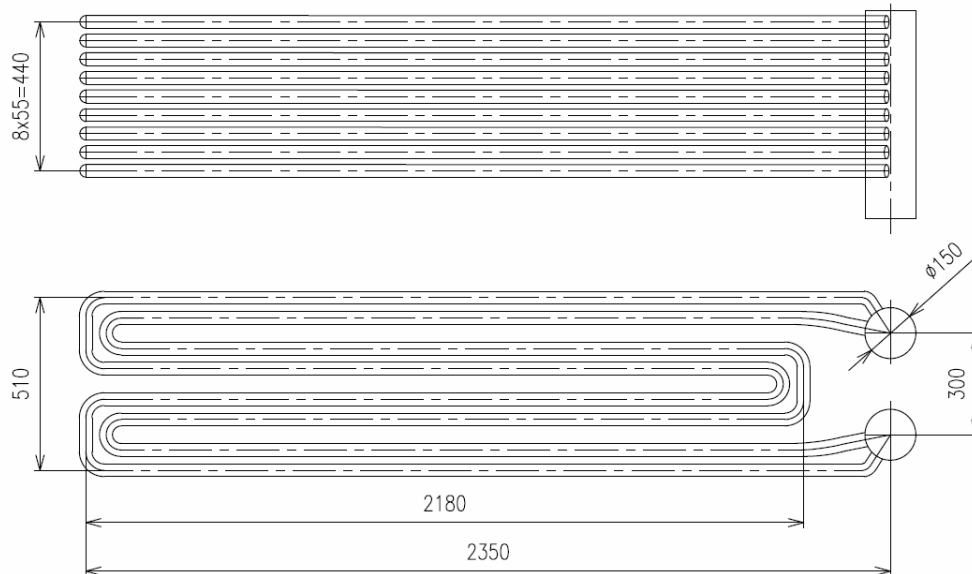
Vnější průměr	$D = 0,038 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,03 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,004 \text{ m}$
Vertikální rozteč	$s_1 = 0,048 \text{ m}$
Počet řad vertikálně	$z_1 = 9$
Horizontální rozteč	$s_2 = 0,0729 \text{ m}$
Počet řad horizontálně	$z_2 = 4$
Střední délka hadů	$l_h = 2,18 \text{ m}$
Počet hadů	$x = 2$

Parametry páry

Vstup	Teplota	$t_{pi} = 352,80 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{pi} = 9,72 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{po} = 335,66 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{po} = 9,72 \text{ MPa}$

Parametry chladícího média

Teplota	$t_{CHM} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak	$p_{CHM} = 10,02 \text{ MPa}$



Obr. 16-1 Nákres vstříku I

16.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Střední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Po} + t_{Pi}}{2} = \frac{335,66 + 352,80}{2} = 344,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16.1)$$

Střední tlak páry

$$p_p^{stř} = 9,72 \text{ MPa} \quad (16.2)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_p^{stř} = 0,022783 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Rychlost páry

$$M_p = M_{pp} \cdot 0,5 = 22,22 \cdot 0,5 = 11,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (16.3)$$

uvažujeme pro vstřík I průtok páry pouze 50% z celkového průtoku

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \right) \cdot 9 \cdot 2 = 0,0127 \text{ m}^2 \quad (16.4)$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_p \cdot v_M^{stř}}{F_p} = \frac{22,22 \cdot 0,022783}{0,0127} = 19,90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (16.5)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

Součinitel dynamické viskozity	$\eta = 218 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu = 4,97 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 69,5 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	$c_p = 4,29 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{218 \cdot 10^{-7} \cdot 4,29 \cdot 1000}{69,5 \cdot 10^{-3}} = 1,346 \quad (16.6)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1, \quad C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = d = 0,03 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (16.7)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{69,5 \cdot 10^{-3}}{0,03} \cdot \left(\frac{19,90 \cdot 0,03}{4,97 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,346^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 4385,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně chladícího média neuvažujeme**16.1.2 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon vstříku I**

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{41,66 - 24,52}{\ln \frac{41,66}{24,52}} = 32,34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16.8)$$

$$\Delta t_v = (t_{pi} - t_{CHM}) = (352,80 - 311,14) = 41,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{po} - t_{CHM}) = (335,66 - 311,14) = 24,52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volba oceli pro výměník

$$\text{Ocel 15 020} \quad \lambda_{ocel}(t_M^{stř}) = 40,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} \cdot \frac{D}{d} + \frac{s}{\lambda_{ocel}} + \frac{1}{\alpha_v}} = \frac{1}{\frac{1}{4385,48} \cdot \frac{0,038}{0,03} + \frac{0,004}{40,4} + 0} = 2578,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (16.9)$$

$1/\alpha_v \rightarrow 0$ přestup tepla na straně vody je zanedbatelný

Skutečná plocha výměníku vstříku I

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2,18 = 18,738 \text{ m}^2 \quad (16.10)$$

Potřebná (ideální) plocha výměníku vstříku I

$$S_{Ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{Vstřiku I}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 1560,08}{2578,37 \cdot 32,34} = 18,710 \text{ m}^2 \quad (16.11)$$

Odchylka skutečné plochy výměníku vstříku I od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{Ideal}}{S_{Ideal}} \cdot 100 = \frac{18,738 - 18,710}{18,710} \cdot 100 = 0,14 \% \quad (16.12)$$

Přijatý tepelný výkon do výparníku

$$Q_{Vstřik I}^{Skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{2578,37 \cdot 18,738 \cdot 32,24}{1000} = 1562,24 \text{ kW} \quad (16.13)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je 0,14%, co je zanedbatelná hodnota.

17 Vstřík II

Vstřík II je umístěn ve směru proudění pracovního média mezi přehřívák P2 a P3. Reguluje tedy teplotu páry na vstupu do P3 a tedy i výstupní páru. Vstřík I je tvořen teplosměnnou plochou umístěnou v dolní části bubny, tedy pod vodou. Ochlazením páry dochází k předání tepla do výparníkové části kotle.

Výměník je tvořen 9 dvouhady uspořádanými nad sebou s minimální vertikální roztečí. Vstřík II je dimenzovaný na 25% průtok přehřáté páry. Regulace průtoku je prováděna pomocí ventilů. V případě potřeby snížení průtoku páry vstříkem začne většina páry proudit tzv. bypassem rovnou do přehříváku P3.

Základní parametry

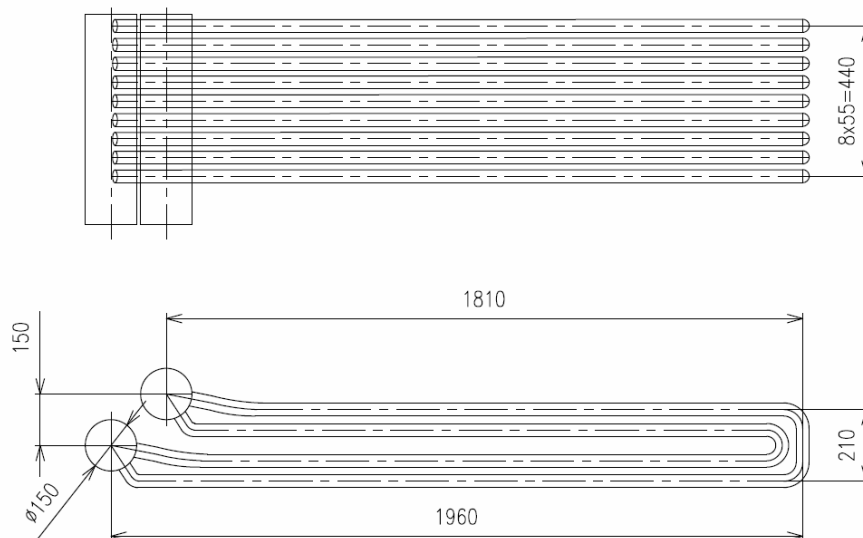
Vnější průměr	$D = 0,038 \text{ m}$
Vnitřní průměr	$d = 0,03 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,004 \text{ m}$
Vertikální rozteč	$s_1 = 0,048 \text{ m}$
Počet řad vertikálně	$z_1 = 9$
Horizontální rozteč	$s_2 = 0,0729 \text{ m}$
Počet řad horizontálně	$z_2 = 2$
Střední délka hadů	$l_h = 1,89 \text{ m}$
Počet hadů	$x = 2$

Parametry páry

Vstup	Teplota	$t_{Pi} = 422,30 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Pi} = 9,52 \text{ MPa}$
Výstup	Teplota	$t_{Po} = 404,65 \text{ }^\circ\text{C}$
	Tlak	$p_{Po} = 9,52 \text{ MPa}$

Parametry chladícího média

Teplota	$t_{CHM} = 311,14 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak	$p_{CHM} = 10,02 \text{ MPa}$



Obr. 17-1 Náskres vstříku II

17.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Sřední teplota páry

$$t_M^{stř} = \frac{t_{Po} + t_{Pi}}{2} = \frac{404,65 + 422,30}{2} = 413,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17.1)$$

Sřední tlak páry

$$p_P^{stř} = 9,52 \text{ MPa} \quad (17.2)$$

Měrný objem páry pro střední hodnoty teploty a tlaku

$$v_P^{stř} = 0,029011 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$$

Rychlost páry

$$M_P = M_{pp} \cdot 0,25 = 22,22 \cdot 0,25 = 5,556 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17.3)$$

uvažujeme pro vstřík I průtok páry pouze 25% z celkového průtoku

Průtočný průřez pro páru

$$F_P = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot z_1 \cdot x = \left(\frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \right) \cdot 9 \cdot 2 = 0,0127 \text{ m}^2 \quad (17.4)$$

Rychlost páry

$$w_P = \frac{M_P \cdot v_M^{stř}}{F_P} = \frac{22,22 \cdot 0,029011}{0,0127} = 12,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17.5)$$

Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak

Součinitel dynamické viskozity	$\eta = 256 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu = 7,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 69,2 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	$c_p = 2,91 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 1000}{\lambda} = \frac{256 \cdot 10^{-7} \cdot 2,91 \cdot 1000}{69,2 \cdot 10^{-3}} = 1,077 \quad (17.6)$$

Opravné koeficienty

$$C_t = 1, \quad C_l = 1 \frac{l_h}{d_e} > 50, \quad C_m = 1$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = d = 0,03 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (podélné obtékání)

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad (17.7)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{69,2 \cdot 10^{-3}}{0,03} \cdot \left(\frac{12,67 \cdot 0,03}{2,91 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,077^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 2017,10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně chladícího média neuvažujeme**17.1.2 Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon vstříku II**

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{111,16 - 93,51}{\ln \frac{111,16}{93,51}} = 102,08 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17.8)$$

$$\Delta t_v = (t_{pi} - t_{CHM}) = (422,30 - 311,14) = 111,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (t_{po} - t_{CHM}) = (404,65 - 311,14) = 93,51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volba oceli pro výměník

Ocel 15 020

$$\lambda_{ocel}(t_M^{stř}) = 40,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} \cdot \frac{D}{d} + \frac{s}{\lambda_{ocel}} + \frac{1}{\alpha_v}} = \frac{1}{\frac{1}{2017,10} \cdot \frac{0,038}{0,03} + \frac{0,004}{40,2} + 0} = 1374,63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (17.9)$$

$1/\alpha_v \rightarrow 0$ přestup tepla na straně vody je zanedbatelný

Skutečná plocha výměníku vstříku II

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot x \cdot l_h = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,89 = 8,123 \text{ m}^2 \quad (17.10)$$

Potřebná (ideální) plocha výměníku vstříku II

$$S_{ideal} = \frac{1000 \cdot Q_{Vstřiku II}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 1141,70}{1374,63 \cdot 102,08} = 8,136 \text{ m}^2 \quad (17.11)$$

Odchylka skutečné plochy výměníku vstříku II od ideální

$$\Delta = \frac{S - S_{ideal}}{S_{ideal}} \cdot 100 = \frac{8,123 - 8,136}{8,136} \cdot 100 = -0,17 \% \quad (17.12)$$

Přijatý tepelný výkon výparníkem

$$Q_{Vstřik I}^{skut} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{1000} = \frac{1374,63 \cdot 8,123 \cdot 102,08}{1000} = 1139,81 \text{ kW} \quad (17.13)$$

Odchylka velikosti výhřevné plochy od ideální je -0,17%, co je zanedbatelná hodnota.

18 Kontrola tepelné bilance

Odchylka od celkového přivedeného tepla na straně spalin musí být do 0,5%.

Celkové bilanční teplo spalovací komory (viz kap. 4.4)

$$Q_{Sk}^b = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_u - I_0) = 1,9309 \cdot 0,9923 \cdot (34985,44 - 21597,64) = 25649,90 \text{ kW} \quad (2-1)$$

Součet tepel všech výhřevných ploch kromě ohříváku vzduchu

$$\sum Q_{bi} = Q_{Sk}^b + Q_{P2}^b + Q_{P3}^b + Q_{PředM}^b + Q_{Mříž}^b + Q_{ZaM}^b + Q_{P1}^b + Q_{Eko2}^b + Q_{Výs}^b + Q_{Eko1}^b \quad (2-1)$$

$$\sum Q_{bi} = 25649,90 + 7994,69 + 6812,37 + 1028,43 + 739,85 + 818,04 + 4087,13 \\ + 9050,11 + 32,45 + 6150,68$$

$$\sum Q_{bi} = 62417,60 \text{ kW}$$

Tepelná bilance

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_K \cdot M_{pv} - \sum Q_{bi} = 34046,08 \cdot 0,9480 \cdot 1,9309 - 62417,60 \quad (2-1)$$

$$\Delta Q = 62323,46 - 62417,60 = -94,14 \text{ kW}$$

Odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p \cdot \eta_K \cdot M_{pv}} \cdot 100 = \frac{-94,14}{62323,46} \cdot 100 = -0,15 \% \quad (2-1)$$

Při výpočtu výhřevných ploch byla dodržena daná odchylka $\pm 0,5\%$ podle [1]

19 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout parní kotel na spalování zemního plynu o výkonu 80t/h při daných parametrech přehřáté páry a napájecí vody. Dále navrhnout řazení výhřevných ploch a jejich velikost s důrazem na uspořádání ve vertikálním směru.

Před samotným výpočtem bylo nutné zvolit vhodné palivo, v tomto případě byl použit tranzitní (ruský) plyn, který se svými parametry vyhovoval zadání. První fází výpočtu byla stechiometrie, pomocí níž se stanovilo potřebné množství spalovacího vzduchu a tím i množství vzniklých spalin. Dalšími kroky bylo určení účinnosti kotle (94,80 %) a následně objemového množství paliva. Návrh tvaru a velikosti spalovací komory se prováděl na základě volby počtu a uspořádání plynových hořáků. Při provedení dvou čistě vertikálních hořáků umístěných ve dně spalovací komory bylo dosaženo teploty na konci ohniště 1236,1°C. Nyní následuje výpočet výhřevných ploch postupně ve směru proudění spalin. Celý kotel je rozdělen na několik tahů. V prvním tahu je přehřívák P2 a P3, dále spaliny projdou přes mříž do druhého tahu na přehřívák P1 a EKO2. Zbývající výhřevné plochy jako EKO1 a trubkový OVZ jsou situovány v prodlouženém druhém tahu mimo samotný kotel. Správnost výpočtů jednotlivých oblastí byla ověřena kontrolou odchylky $\pm 2 \%$ a celkové odchylky tepelné bilance celého kotle $\pm 0,5 \%$. Teplota odchodu spalin do komína je omezená (112,6°C) z důvodu nebezpečí podkročení teploty rosného bodu na trubkách OVZ u stěn spalínového kanálu a teploty ohřívání vzduchu, protože při vyšších teplotách spalovacího vzduchu se významně zhoršují emise.

Podle normy pro vodotrubné kotle a pomocná zařízení ČSN EN 12952-12, část 12: Požadavky na kvalitu napájecí vody a kotelní vody, bylo nutné realizovat regulaci přehřáté páry pomocí tepelného výměníku umístěného v bubnu a chlazeného okolní vodou. Navrženým výměníkem neprochází celé množství páry, ale jen její část. V případě vstříku I se jedná o 50 % a vstříku II jen 25 % veškeré páry, zbytek je veden tzv. bypassem na další výhřevnou plochu. Aby se buben zbytečně neprodražil, tak tepelný výkon přenesený výměníkem odpovídá u vstříku I - 3 % a u vstříku II - 2 % napájecí vody konvenčního vstříku.

20 Seznam použitých zdrojů

- [1] Dlouhý, T.; Výpočty kotlů a spalinových výměníků. 3. vydání Praha: ČVUT, 2007. 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] Budaj. Florián; Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT, Brno 1992
- [3] Josef Fík; Základní fyzikální vlastnosti ZP (I). TZB-info [online]. 2004, ISSN 1801-4399. [cit. 5. dubna 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/1921-zakladni-fyzikalni-vlastnosti-zp-i>
- [4] Software Microsoft Office Excel 2007
- [5] Software XSteam – IAPWS IF97 Excel Steam Tables by Magnus Holmgren; www.x-eng.com
- [6] AutoCAD 2013 – studentská verze

21 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek	Název obrázku
Obr. 2-1	I-t diagram vlhkých spalin
Obr. 5-1	Pilový diagram
Obr. 6-1	Schéma přehříváku P2
Obr. 7-1	Schéma přehříváku P3
Obr. 9-1	Nákres spalinové mříže v řezu
Obr. 11-1	Schéma přehříváku P1
Obr. 14-1	Schéma Ekonomizéru 1
Obr. 15-1	Schéma OVZ
Obr. 16-1	Nákres vstříku I
Obr. 17-1	Nákres vstříku II
Tabulka	Název tabulky
Tab. 1	Složení a výhřevnost tranzitního plynu
Tab. 2	Entalpie vzduchu a spalin pro různé hodnoty přebytku vzduchu
Tab. 3	Parametry páry v jednotlivých výhřevných plochách

22 Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Popis
A, B, C	m	rozměry spalínového kanálu
A', B'	m	pomocné rozměry spalínového kanálu
a_o	–	stupeň černosti ohniště
a_{ns}	–	stupeň černosti nesvítivé části plamene
a_{pl}	–	efektivní stupeň černosti plamene
a_{st}	–	stupeň černosti povrchu
a_{sv}	–	stupeň černosti svítivé části plamene
B_o	–	Boltzmanovo číslo
c_p	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	měrné teplo vlhkého vzduchu
C_l	–	oprava svazku na poměrnou délku
C_m	–	oprava svazku podle druhu ohřevu
C_s	–	oprava uspořádání svazku
C_t	–	oprava svazku v závislosti na teplotě
C_z	–	oprava svazku na počet řad
D	m	vnější průměr
d	m	vnitřní průměr
d_e	m	ekvivalentní průměr
F_p	m^2	průtočný průřez pro páru
F_{SP}	m^2	průtočný průřez pro spaliny
F_{st}	m^2	povrch stěn spalovací komory
$F_{\dot{u}}$	m^2	účinná sálavá plocha
F_V	m^2	průtočný průřez pro vzduch
f	–	součinitel vlhkosti vzduchu
I	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie
ΔI	$kJ \cdot m^{-3}$	rozdíl entalpií

I_{in}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie na vstupu
I_{nv}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie napájecí vody
I_{out}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie na výstupu
I_{pp}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie přehřáté páry
I_{SP}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie spalin
I_{SPmin}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie minimálního množství spalin
I_u	$kJ \cdot m^{-3}$	užitečné teplo uvolněné v ohništi
I_{VZ}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie vzduchu
I_{VZmin}	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie minimálního množství vzduchu
I_0	$kJ \cdot m^{-3}$	entalpie spalin na konci ohniště
k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel prostupu tepla
$k \cdot p \cdot s$	—	optická hustota spalin
k_c	$1 \cdot m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
k_{sp}	$1 \cdot m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
l	m	délka membránové trubky
l_h	m	střední délka hadu
l_{tr}	m	délka trubky
l_z	m	střední délka závěsných trubky
M	—	poloha maximální teploty plamene
M_{Op}	$kg \cdot s^{-1}$	množství odběru páry
M_{pp}	$kg \cdot s^{-1}$	množství přehřáté páry
M_{Pr}	—	opravný koeficient pro Prandtlovo číslo
M_{pv}	$m^3 \cdot s^{-1}$	množství paliva
M_v	—	opravný koeficient pro kinematickou viskozitu
m	—	součinitel zaplnění ohniště svítivým plamenem
n_{tr}	—	počet trubek
n_z	—	počet závěsných trubek
O	m	obvod průřezu kanálu

O_{H_2O}	$m^3 \cdot m^{-3}$	objem vodní páry ve vlhkém vzduchu
O_{SP}	$m^3 \cdot s^{-1}$	objemový průtok spalin
O_{SPmin}	$m^3 \cdot m^{-3}$	minimální objem vlhkých spalin
O_{SPmin}^S	$m^3 \cdot m^{-3}$	minimální objem suchých spalin
O_{SP}^V	$m^3 \cdot m^{-3}$	objem vlhkých spalin
O_{VZ}	$m^3 \cdot m^{-3}$	objem vlhkého vzduchu
O_{VZ}^S	$m^3 \cdot m^{-3}$	objem suchého vzduchu
O_{VZmin}^S	$m^3 \cdot m^{-3}$	minimální objem suchého vzduchu
O_{VZ}^{OVZ}	$m^3 \cdot s^{-1}$	množství přiváděného vzduchu do OVZ
O_x^S	$m^3 \cdot m^{-3}$	objemy jednotlivých složek min. množství vlhkých spalin $x = CO_2, O_2, N_2, H_2O, Ar$
O_x	$m^3 \cdot m^{-3}$	objemy jednotlivých složek vlhkých spalin $x = CO_2, O_2, N_2, H_2O, Ar$
P	—	parametr pro OVZ při křížovém proudění
Pr	—	Prandtlovo číslo
p	MPa	tlak v ohništi
p_{nv}	MPa	tlak napájecí vody
p_p	MPa	parciální tlak páry
p_{pp}	MPa	tlak přehřáté páry
p_{SP}	MPa	parciální tlak tříatomových plynů
Q^b	kW	bilanční teplo přijaté výhřevnou plochou
Q^{Celk}	kW	celkové přijaté teplo výhřevnou plochou
Q^v	kW	výrobní teplo páry
Q_r^i	$MJ \cdot Nm^{-3}$	výhřevnost paliva
Q_p^p	$MJ \cdot m^{-3}$	celkové přivedené teplo do kotle
Q_{VZV}	$kJ \cdot m^{-3}$	teplo potřebné k přehřátí vzduchu
ΔQ	kW	odchylka tepel

\bar{q}	$kW \cdot m^{-2}$	střední tepelné zatížení stěn ohniště
q_f	$MW \cdot m^{-2}$	průřezové zatížení ohniště
q_v	$kW \cdot m^{-3}$	objemové zatížení ohniště
R	—	parametr pro OVZ při křížovém proudění
r	—	měrná plynová konstanta
r_{H_2O}	—	objemová část vodní páry
r_{sp}	—	objemová část tříatomových plynů
S	m^2	výhřevná plocha
s	m	účinná tloušťka sálavé vrstvy
s_1	m	příčná rozteč
s_2	m	podélná rozteč
T_z	K	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
t	$^{\circ}C$	teplota
t_M	$^{\circ}C$	teplota média
t_{SP}	$^{\circ}C$	teplota spalin
$t^{stř}$	$^{\circ}C$	střední teplota
Δt	$^{\circ}C$	teplotní spád
Δt_m	$^{\circ}C$	menší rozdíl teplot
Δt_v	$^{\circ}C$	větší rozdíl teplot
V_0	m^3	objem ohniště
$v^{stř}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	střední měrný objem
w_P	$m \cdot s^{-1}$	rychlost páry
w_{SP}	$m \cdot s^{-1}$	rychlost spalin
w_V	$m \cdot s^{-1}$	rychlost vody
x	—	počet hadů
x_i	—	úhlový součinitel
x_{pl}	—	poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene
Z_{SO}	—	ztráta sdílením tepla

z_1	—	počet řad příčně
z_2	—	počet řad podélně
α, β	—	přebytek vzduchu
α_k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin
α_p	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry
$\alpha_{Sál}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla sáláním
α_{SP}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na straně spalin
α_V	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na straně vzduchu
ω	—	součinitel omývání desek
ξ	—	součinitel zanesení stěn
ξ_{CN}	—	ztráta chemickým nedopalem
ξ_{MN}	—	ztráta mechanickým nedopalem
ξ_K	—	komínová ztráta
ξ_S	—	ztráta sdílením tepla do okolí
η	$N \cdot s \cdot m^{-2}$	dynamická viskozita
η_K	—	účinnost kotle
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
σ_1	—	poměrná příčná rozteč
σ_2	—	poměrná podélná rozteč
σ'_2	—	poměrná úhlopříčná rozteč
π	—	Ludolfovo číslo
ρ_{SP}	$kg \cdot m^{-3}$	hustota spalin
φ	—	součinitel uchování tepla
Ψ	—	součinitel tepelné efektivity
ϑ_a	$^{\circ}C$	teplota nechlazeného plamene
ϑ_0	$^{\circ}C$	teplota na konci ohništi

Zkratka	Význam
EKO1	ekonomizér č.1
EKO2	ekonomizér č.2
OVZ	ohřívák vzduchu
P1	přehřívák č.1
P2	přehřívák č.2
P3	výstupní přehřívák
Výp	výparník
b	bilanční
in	vstupní stav
M	médium
nv	napájecí voda
out	výstupní stav
pp	přehřátá pára
SP	spaliny
VZ	vzduch

23 Seznam příloh

Příloha č.1: Výkres parního kotle