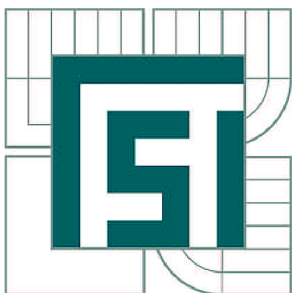


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PLYNOFIKACE UHELNÉHO KOTLE 210 T/H; 13,63 MPA; 540 °C

GASIFICATION OF COAL BOILER 210 T/H; 13,63 MPA; 540 °C

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF ZAJÍC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Zajíc

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:

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

v anglickém jazyce:

Gasification of coal boiler 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající parní kotel 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C s výtavným ohništěm, s přirozenou cirkulací, na spalování černého uhlí navrhnete pro čistě plynový provoz při zachování původního tepelného výkonu a parametrů páry.

Navrhnete úpravu spalovací komory a výhřevných ploch a provedte tepelný výpočet kotle.

Pro provedení výpočtu obdržíte potřebné výkresy, konstrukční údaje a popis kotle.

Palivo:

Zemní plyn - výhřevnost 34,30 MJ/Nm³

Složení - CH₄=94,31%; C₂H₆=0,51 %; C₃H₈=0,11 %; C₄H₁₀=0,1 %; CO₂=3,38 %; N₂=1,59 %

Teplota napájecí vody - 170°C

Cíle diplomové práce:

1/ Navrhnete stávající kotel na spalování černého uhlí pro čistě plynový provoz.

2/ Navrhnete úpravu spalovací komory a výhřevných ploch a provedte tepelný výpočet kotle.

3/ Stávající regenerativní ohříváky vzduchu Ljungström nahradíte trubkovým ohřívákem vzduchu.

4/ Navrhnete opatření pro dodržení emisního limitu NO_x=100 mg/Nm³.

Seznam odborné literatury:

Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Budaj: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

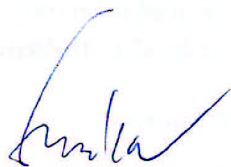
Baláš, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

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

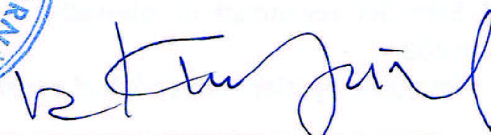
Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 20.11.2012



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá plynofikací uhelného kotle a jeho tepelným přepočtem. V první části je proveden výpočet spalovací komory. Následuje přepočet teplosměnných ploch a návrh trubkového ohříváku vzduchu, kterým bude nahrazen stávající ohřívák vzduchu Ljungström. Důraz je přitom kladen na zachování stávajících parametrů páry a hlavně dodržení emisního limitu NO_x .

Abstract

This thesis aims to gas installation of the coal boiler and its thermal recount. In the first part, there is implemented calculation of the combusting chamber. After that follows the recalculation of heat exchange surfaces and proposal tube air heater, which will replace the existing air heater Ljungström. The emphasis is placed on the preservation of the exsiting steam parametrs and keeps emission limit of NO_x .

Klíčová slova

Parní kotel, tepelný výpočet, plynofikace.

Keywords

Steam boiler, thermal calculation, gasification.

Bibliografická citace

ZAJÍC, J. Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 123 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval sám bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury, uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2013

.....

podpis autora

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě během celých pěti let studia podporovali. Dále pak konzultantovi panu Ing. Antonínu Vybíralovi ze společnosti PROVYKO za poskytnutí podkladů, cenné odborné rady a hlavně jeho čas, který mi věnoval. A v neposlední řadě vedoucímu práce panu Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

OBSAH

1 ÚVOD	15
2 OBJEMY A ENTALPIE VZDUCHU A SPALIN	16
2.1 Stechiometrie	16
2.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin	17
2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování.....	18
2.4 Entalpie spalin při recirkulaci.....	21
3 TEPELNÁ BILANCE KOTLE	23
3.1 Teplo přivedené do kotle.....	23
3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	23
3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách	23
3.2.2 Ztráta sdílením tepla do okolí	23
3.2.3 Ztráta citelným teplem spalin.....	23
3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva.....	24
4 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY	25
4.1 Spalovací komora	25
4.2 Tepelný výpočet ohniště.....	26
4.2.1 Teplota spalin na výstupu z ohniště	26
4.2.2 Součinitel M.....	26
4.2.3 Boltzmanovo číslo	27
4.2.4 Stupeň černosti ohniště	28
5 BILANČNÍ VÝPOČET TEPLOSMĚNNÝCH PLOCH ZE STRANY MÉDIA	30
5.1 Tlak napájecí vody	30
5.2 Dílčí výkony jednotlivých ploch	30
5.2.1 EKO	30
5.2.2 Výparník	31
5.2.3 Přehříváky	31
5.3 Pilový diagram.....	33
6 OBLAST DESKOVÉHO PŘEHŘÍVÁKU.....	34
6.1 Bilanční teplo spalin	34
6.2 Deskový přehřívák P2DP výstupní (krajní).....	35
6.2.1 Součinitel prostupu tepla.....	36

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

6.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	38
6.2.3	Výhřevná plocha	39
6.2.4	Rovnice sdílení tepla.....	39
6.3	Deskový přehřívák P2DP vstupní (středové)	39
6.3.1	Součinitel prostupu tepla	40
6.3.2	Střední logaritmický teplotní spád	41
6.3.3	Výhřevná plocha	41
6.3.4	Rovnice sdílení tepla.....	42
6.4	Stěny (část výparníku)	42
6.4.1	Součinitel prostupu tepla	42
6.4.2	Střední logaritmický teplotní spád	43
6.4.3	Výhřevná plocha	44
6.4.4	Rovnice sdílení tepla.....	44
6.5	Strop nad DP (část P1).....	44
6.5.1	Součinitel prostupu tepla	44
6.5.2	Střední logaritmický teplotní spád	46
6.5.3	Výhřevná plocha	46
6.5.4	Rovnice sdílení tepla.....	47
6.6	Celková bilance oblasti P2DP.....	47
7	OBLAST MŘÍŽE 1.....	48
7.1	Bilanční teplo spalín.....	48
7.2	Mříž 1	49
7.2.1	Součinitel prostupu tepla	49
7.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	51
7.2.3	Výhřevná plocha	51
7.2.4	Rovnice sdílení tepla.....	51
7.3	Celková bilance oblasti mříže 1.....	51
8	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P32.....	52
8.1	Bilanční teplo spalín.....	52
8.2	Přehřívák P32.....	53
8.2.1	Součinitel prostupu tepla	53
8.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	56
8.2.3	Výhřevná plocha	56
8.2.4	Rovnice sdílení tepla.....	56
8.3	Stěny (část výparníku)	56
8.3.1	Součinitel prostupu tepla	56
8.3.2	Střední logaritmický teplotní spád	58
8.3.3	Výhřevná plocha	58
8.3.4	Rovnice sdílení tepla.....	58
8.4	Strop nad P32 (část P1).....	59
8.4.1	Součinitel prostupu tepla	59
8.4.2	Střední logaritmický teplotní spád	61

8.4.3	Výhřevná plocha	61
8.4.4	Rovnice sdílení tepla	61
8.5	Celková bilance oblasti P32	61
9	OBLAST MŘÍŽE 2	62
9.1	Bilanční teplo spalin	62
9.2	Mříž 2	63
9.2.1	Součinitel prostupu tepla	63
9.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	65
9.2.3	Výhřevná plocha	65
9.2.4	Rovnice sdílení tepla	65
9.3	Celková bilance oblasti mříže 2	65
10	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P31	66
10.1	Bilanční teplo spalin	66
10.2	Přehřívák P31	67
10.2.1	Součinitel prostupu tepla	67
10.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	70
10.2.3	Výhřevná plocha	70
10.2.4	Rovnice sdílení tepla	70
10.3	Strop nad P31 (část P1)	70
10.3.1	Součinitel prostupu tepla	70
10.3.2	Střední logaritmický teplotní spád	72
10.3.3	Výhřevná plocha	73
10.3.4	Rovnice sdílení tepla	73
10.4	Celková bilance oblasti P31	73
11	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P12	74
11.1	Bilanční teplo spalin	74
11.2	Přehřívák P12	75
11.2.1	Součinitel prostupu tepla	75
11.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	78
11.2.3	Výhřevná plocha	78
11.2.4	Rovnice sdílení tepla	78
11.3	Strop nad P12 (část P1)	78
11.3.1	Součinitel prostupu tepla	78
11.3.2	Střední logaritmický teplotní spád	80
11.3.3	Výhřevná plocha	81
11.3.4	Rovnice sdílení tepla	81
11.4	Celková bilance oblasti P12	81
12	OBLAST MŘÍŽE 3	82

12.1	Bilanční teplo spalin	82
12.2	Mříž 3	83
12.2.1	Součinitel prostupu tepla	83
12.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	85
12.2.3	Výhřevná plocha	86
12.2.4	Rovnice sdílení tepla	86
12.3	Celková bilance oblasti mříže 3	86
13	VRATNÁ KOMORA	87
13.1	Bilanční teplo spalin	87
13.2	Závěsné trubky (část P1)	87
13.2.1	Množství tepla odevzdané závěsným trubkám	87
13.3	Zadní stěna a strop (část P1)	89
13.3.1	Množství tepla odevzdané zadní stěně	89
13.4	Stěny EKO2	91
13.4.1	Množství tepla odevzdané do EKA2	91
13.5	Množství tepla odevzdané ze spalin do oblasti vratné komory	92
14	OBLAST PŘEHŘÍVÁKU P11	93
14.1	Bilanční teplo spalin	93
14.2	Přehřívák P11	94
14.2.1	Součinitel prostupu tepla	94
14.2.2	Střední logaritmický teplotní spád	96
14.2.3	Výhřevná plocha	97
14.2.4	Rovnice sdílení tepla	97
14.3	Závěsné trubky (část P1)	97
14.3.1	Součinitel prostupu tepla	97
14.3.2	Střední logaritmický teplotní spád	99
14.3.3	Výhřevná plocha	100
14.3.4	Rovnice sdílení tepla	100
14.4	Stěny (část EKA2)	100
14.4.1	Součinitel prostupu tepla	100
14.4.2	Střední logaritmický teplotní spád	101
14.4.3	Výhřevná plocha	102
14.4.4	Rovnice sdílení tepla	102
14.5	Celková bilance oblasti P11	102
15	OBLAST EKA2	103
15.1	Bilanční teplo spalin	103
15.2	EKO2	104
15.2.1	Součinitel prostupu tepla	104

15.2.2	Střední logaritmický teplotní spád.....	106
15.2.3	Výhřevná plocha.....	106
15.2.4	Rovnice sdílení tepla	106
15.3	Celková bilance oblasti EKA2.....	106
16	OBLAST OVZ	107
16.1	Rovnice tepelné bilance na straně média.....	107
16.2	Bilanční teplo spalin – vstupní entalpie spalin	107
16.3	OVZ.....	108
16.4	Rovnice sdílení tepla – potřebná plocha	108
16.4.1	Součinitel prostupu tepla	108
16.4.2	Teplotní spád	111
16.4.3	Skutečná výhřevná plocha	111
16.4.4	Rovnice sdílení tepla – skutečné teplo.....	111
16.5	Celková bilance OVZ.....	111
17	PŘÍDAVNÉ EKO1 (NAVRHOVANÉ)	112
17.1	Tepelná bilance na straně média.....	112
17.2	Bilanční teplo spalin	112
17.3	Oblast navrhovaného EKA1.....	113
17.4	Rovnice sdílení tepla – potřebná plocha	113
17.4.1	Součinitel prostupu tepla	113
17.4.2	Střední logaritmický teplotní spád.....	115
17.4.3	Výhřevná plocha.....	115
17.4.4	Rovnice sdílení tepla – skutečné teplo.....	115
17.5	Celková bilance oblasti navrhovaného EKA1.....	115
18	CELKOVÁ BILANCE KOTLE	116
19	ZÁVĚR	117
20	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	118
21	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
22	SEZNAM TABULEK	118
23	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	119

24	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	123
25	SEZNAM PŘÍLOH	123

1 Úvod

Trendem a zároveň do jisté míry nutností dnešní doby je ubírat se směrem ekologického způsobu života. Cílem je chránit vody, lesy, ovzduší a v podstatě celé životní prostředí. Mezi největší znečišťovatele patří průmysl a tedy i energetika. Snahou proto je co nejvíce zamezit vzniku emisí z činnosti těchto provozů. Tento cíl si klade i SMĚRNICE EVOPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění), která vstupuje v platnost 1. ledna 2016. Tato diplomová práce vychází z požadavků nové směrnice. Pro dosažení vyžadovaných emisních limitů 100 mg/Nm^3 NO_x i CO počítá s plynofikací uhelného kotle, tedy změnou palivové základny. Označením NO_x máme na mysli oxidy dusíku NO (oxid dusnatý) a NO_2 (oxid dusičitý). Tyto oxidy vznikají z dusíku, který je obsažený ve vzduchu a palivu. Nejvíce se projevuje podíl NO_x termických, jejichž vznik je závislý na vysoké teplotě, době setrvání složek dusíku v těchto teplotách a množství dusíku. Snížení emisí NO_x lze tedy dosáhnout kromě změny palivové základny také snížením teploty jádra plamene recirkulací spalin do hořáků, snížením teploty spalovacího vzduchu a minimalizací přebytku spalovacího vzduchu.

Úkolem diplomové práce je přepočítat stávající uhelný parní kotel o výkonu 210 t/h, 13,63 MPa a 540 °C pro provoz na zemní plyn a současně dodržet i stávající parametry páry. Jedním z hlavních úkolů, jak dosáhnout těchto požadavků, je úprava spalovací komory kotle, což obnáší návrh a rozmístění hořáků ve stěnách ohniště, úpravu velikosti a tvaru ohniště, zkrácení membránových stěn výparníku a volbu nového dna spalovací komory. Stávající parní kotel s výtavným ohništěm navržený v roce 1976 závodem PBS pro teplárnu v Košicích je realizován jako svislý dvoutahový.

Změna palivové základny s sebou nese i mnohé další změny, například v průběhu teplot spalin ve spalinovém kanále a přebytku tepla na výstupu kotle. Pro dosažení maximální účinnosti a snížení komínové ztráty bude nutné navrhnout doplňkový ekonomizér a ohřívák vzduchu.

Stávající regenerativní OVZ Ljungström, řazený na konci druhého tahu kotle, předeheřívá vzduch na teplotu okolo 350 °C, což je pro spalování plynu a tvorbu emisí nevýhodné. Proto je kladen požadavek na návrh OVZ trubkového, který ohřeje spalovací vzduch na teplotu nižší. Teplota napájecí vody je 170 °C, z čehož vyplývá, že ekonomizér by dostatečně nevychladil spaliny, čímž by se zvýšila komínová ztráta a klesla tepelná účinnost kotle.

Při všech výpočtech, pokud není uvedeno jinak, je použito postupů, doporučení, rovnic, hodnot a označení z [1]. Samotný výpočet je realizován prostřednictvím [3] s podporou [4].

2 Objemy a entalpie vzduchu a spalin

Palivem pro kotel bude zemní plyn, jeho složení a výhřevnost je v Tab. 2-1. Veškerá měrná tepla a entalpie spalin a vzduchu jsou ve výpočtu vztažena na 1 m³ při teplotě 0 °C a tlaku 0,101 MPa (normální podmínky).

CH ₄	94,31	%
C ₂ H ₆	0,51	%
C ₃ H ₈	0,11	%
C ₄ H ₁₀	0,1	%
CO ₂	3,38	%
N ₂	1,59	%
suma	100	%
Q _i ^r	34,3	MJ/Nm ³

Tab. 2-1 Složení zemního plynu a jeho výhřevnost

2.1 Stechiometrie

Minimální množství kyslíku potřebného ke spálení 1 m³ suchého plynu

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

$$O_{O_2 \min} = 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{94,91}{100} + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{0,51}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0,11}{100} + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0,1}{100} - \frac{0}{100}$$

$$O_{O_2 \min} = 1,916 m^3 / m^3$$

Minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1 m³ plynu

$$O_{VZ \min}^S = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} = \frac{1,916}{0,21} = 9,124 m^3 / m^3 \quad (2.1.2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu potřebného ke spálení 1 m³ plynu

$$O_{VZ \min} = f \cdot O_{VZ \min}^S = 1,03 \cdot 9,124 = 9,398 m^3 / m^3 \quad (2.1.3)$$

- pro teplotu vzduchu 30 °C a relativní vlhkost 70 % je součinitel $f=1,03$

Jednotlivé složky minimálního množství vlhkých spalinObjem CO₂ ve spalinách

$$O_{CO_2}^S = 0,01 \cdot \left(CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 0,03 \cdot O_{VZ\min}^S \right) \quad (2.1.4)$$

$$O_{CO_2}^S = 0,01 \cdot (0 + 3,38 + 1 \cdot 94,31 + 2 \cdot 0,51 + 3 \cdot 0,11 + 4 \cdot 0,1 + 0,03 \cdot 9,124) = 0,991 m^3 / m^3$$

Objem dusíku ve spalinách

$$O_{N_2}^S = 0,01 \cdot (N + 78,05 \cdot O_{VZ\min}^S) = 0,01 \cdot (1,59 + 78,05 \cdot 9,124) = 7,137 m^3 / m^3 \quad (2.1.5)$$

Objem argonu ve spalinách

$$O_{Ar}^S = 0,0092 \cdot O_{VZ\min}^S = 0,0092 \cdot 9,124 = 0,084 m^3 / m^3 \quad (2.1.6)$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2O\min} = 0,01 \cdot \left(\sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + H_2 + H_2 S \right) + (f - 1) \cdot O_{VZ\min}^S + (f' - 1)$$

$$O_{H_2O\min} = 0,01 \cdot \left(\frac{4}{2} \cdot 94,31 + \frac{6}{2} \cdot 0,51 + \frac{8}{2} \cdot 0,11 + \frac{10}{2} \cdot 0,1 + 0 + 0 \right) +$$

$$+ (1,03 - 1) \cdot 9,124 + (1 - 1)$$

$$O_{H_2O\min} = 2,185 m^3 / m^3$$

- plyn neobsahuje vodu, proto $f' = 1$ **Minimální množství suchých spalin**

$$O_{SP\min}^S = O_{CO_2}^S + O_{N_2}^S + O_{Ar}^S = 0,991 + 7,137 + 0,084 = 8,212 m^3 / m^3 \quad (2.1.8)$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SP\min}^{SV} = O_{CO_2}^S + O_{N_2}^S + O_{Ar}^S + O_{H_2O\min} = 0,991 + 7,137 + 0,084 + 2,185$$

$$O_{SP\min}^{SV} = 10,397 m^3 / m^3 \quad (2.1.9)$$

2.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin

Během procesu spalování může docházet k nedokonalému promísení vzduchu s palivem. Může se tedy stát, že nebude dostatek vzduchu pro spálení veškerého paliva. Spaluje se proto s přebytkem vzduchu α , který je volen na základě zkušeností a výpočtů. Pro plyn je doporučován součinitel přebytku vzduchu 1,05-1,15. Vzhledem k tomu, že pro snížení emisí NO_x je třeba přebytek vzduchu minimalizovat, bylo voleno $\alpha = 1,05$.

Skutečné množství spalin

$$O_{SP} = O_{SP\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\min} = 10,397 + (1,05 - 1) \cdot 9,398 = 10,867 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.2.1)$$

Skutečné množství vzduchu

$$O_{VZ} = \beta \cdot O_{VZ\min} = 1,05 \cdot 9,398 = 9,868 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.2.2)$$

Součinitel přebytku vzduchu β sleduje přísávání falešného vzduchu po trase spalin v kotli. V našem případě předpokládáme utěsněný kotel, tedy $\beta = \alpha = 1,05$.

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0 + 0,991}{10,868} = 0,091 \quad (2.2.3)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{2,197}{10,868} = 0,202 \quad (2.2.4)$$

kde

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

$$O_{H_2O} = 2,185 + (1,03 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,124 = 2,197 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,091 + 0,202 = 0,293 \quad (2.2.6)$$

2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 m³ plynu s daným přebytkem vzduchu se určí z rovnice (2.3.1) a entalpie spalin s přebytkem vzduchu $\alpha = 1$ z rovnice (2.3.2).

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

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

- entalpie i se odečtou pro příslušné složky z Tab. 2-2.

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

t [°C]	O ₂ [kJ/m ³]	CO ₂ [kJ/m ³]	N ₂ [kJ/m ³]	Ar [kJ/m ³]	H ₂ O [kJ/m ³]	c vzduch [kJ/m ³ K]
100	131,7	170	129,5	93,07	150,6	1,324
200	267	357,5	259,9	186	304,5	1,331
300	406,8	558,8	392,1	278,8	462,8	1,342
400	550,9	771,9	526,7	371,7	625,9	1,354
500	698,7	994,4	664	464,7	794,5	1,368
600	849,9	1225	804,3	557,3	968,8	1,383
700	1003	1462	947,3	650,2	1149	1,398
800	1159	1705	1093	743,1	1335	1,411
900	1318	1952	1241	835,7	1526	1,424
1000	1477	2203	1392	928,2	1723	1,437
1100	1638	2458	1544	1020	1925	1,449
1200	1802	2716	1698	1114	2132	1,461
1300	1965	2976	1853	1207	2344	1,472
1400	2129	3239	2009	1300	2559	1,483
1500	2293	3503	2166	1393	2779	1,492
1600	2465	3769	2325	1577	3002	1,501
1800	2804	4305	2643	1742	3458	1,515
2000	3138	4844	2965	1857	3925	1,532
2500	4007	6203	3779	2320	5132	1,545

Tab. 2-2 Entalpie složek spalin

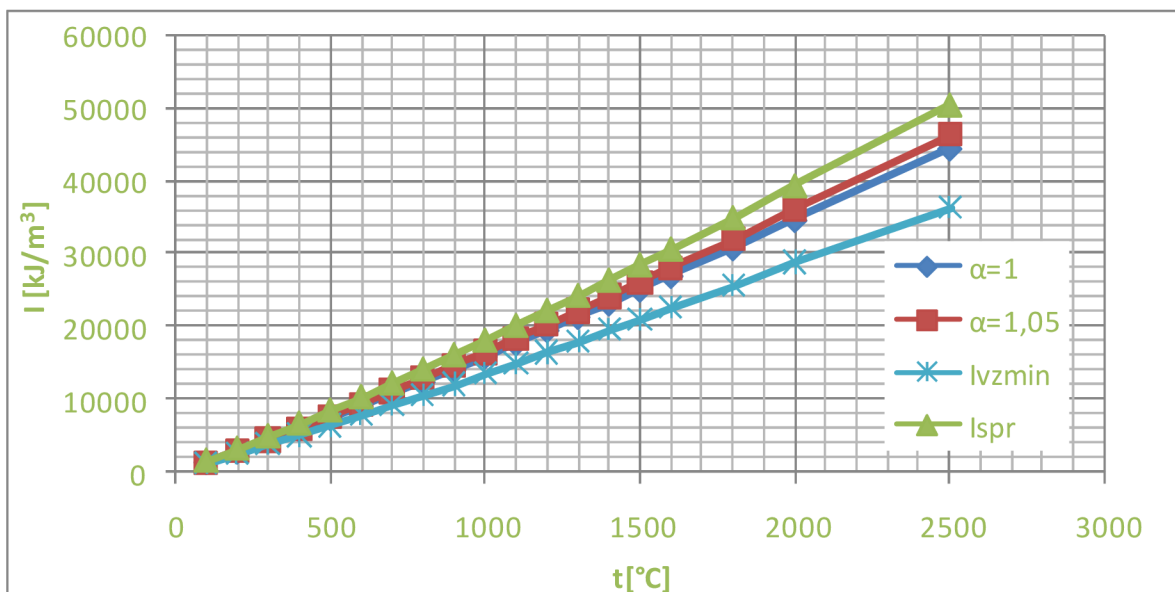
Entalpie minimálního množství vzduchu se určí z rovnice (2.3.3). Měrné teplo vlhkého vzduchu lze brát z Tab. 2-2. Výsledné hodnoty entalpií vzduchu a spalin pro jednotlivé teploty a přebytky vzduchu jsou pak seřazeny v Tab. 2-3.

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

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

t [°C]	I _{SPmin} [kJ/m ³]	I _{VZmin} [kJ/m ³]	I _{SP} =I _{SPmin} +(α-1)I _{VZmin}		
			α=1	α=1,05	α=1,05
100	1429,579	1244,265	1429,579	1491,792	1629,072
200	2890,124	2501,686	2890,124	3015,208	3292,678
300	4386,795	3783,542	4386,795	4575,972	4997,068
400	5922,785	5089,832	5922,785	6177,276	6745,73
500	7499,386	6428,074	7499,386	7820,79	8540,485
600	9117,846	7798,269	9117,846	9507,759	10382,7
700	10774,83	9196,657	10774,83	11234,67	12268,52
800	12469,71	10608,2	12469,71	13000,12	14196,43
900	14195,86	12044,18	14195,86	14798,07	16159,84
1000	15960,49	13504,59	15960,49	16635,72	18166,6
1100	17747,09	14979,1	17747,09	18496,04	20198,11
1200	19562,04	16476,17	19562,04	20385,85	22261,82
1300	21396,95	17983,57	21396,95	22296,13	24347,89
1400	23248,52	19511,65	23248,52	24224,11	26453,29
1500	25119,15	21032,21	25119,15	26170,76	28579,08
1600	27020,23	22569,68	27020,23	28148,71	30739,05
1800	30831,15	25627,72	30831,15	32112,53	35067,64
2000	34693,42	28794,76	34693,42	36133,16	39458,26
2500	44525,77	36298,88	44525,77	46340,72	50605,15

Tab. 2-3 I-t tabulka vzduchu a produktů spalování



Obr. 1 I-t diagram spalín

2.4 Entalpie spalin při recirkulaci

Recirkulace spalin je přivedení části spalin z výstupu kotle zpět do prostor ohniště. V našem případě se recirkulace zavádí kvůli snížení teploty v ohništi a tím potlačení tvorby NO_x .

Koeficient recirkulace

Koeficient recirkulace r je znám, byl volen $r=0,12$, neznámý je však objem recirkulovaných spalin O_r .

$$r = \frac{O_r}{O_{SPod}} \Rightarrow O_r = r \cdot O_{SPod} = 0,12 \cdot 10,867 = 1,304 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.4.1)$$

Objem spalin v kterémkoliv bodě traktu až do místa jejich odběru

Objem spalin po dráze spalinovodu je závislý na množství přísávaného falešného vzduchu. Jelikož je kotel těsný a přísávání nulové, je objem spalin v celém úseku od ohniště do místa odběru stejný.

$$O_{SPr} = O_{SP} + r \cdot O_{SPod} = 10,867 + 0,12 \cdot 10,867 = 12,171 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.4.2)$$

Výpočet entalpií spalin bez recirkulace

Poměrové objemové složení dílčích složek spalin s ohledem na $\alpha=1,05$ v objemu spalin

$$p_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0,991}{10,867} = 0,091 \quad (2.4.3)$$

$$p_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SP}} = \frac{7,137}{10,867} = 0,657 \quad (2.4.4)$$

$$p_{Ar} = \frac{O_{Ar}}{O_{SP}} = \frac{0,084}{10,867} = 0,008 \quad (2.4.5)$$

$$p_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{2,185}{10,867} = 0,201 \quad (2.4.6)$$

$$p_{VZ} = \frac{(\alpha-1) \cdot O_{VZmin}}{O_{SP}} = \frac{(1,05-1) \cdot 9,398}{10,867} = 0,043 \quad (2.4.7)$$

Entalpie spalin s recirkulací

Entalpie spalin s ohledem na recirkulaci spalin a danou teplotu se vypočte z rovnice (2.4.8). Výsledné hodnoty jsou pak uvedeny výše v Tab. 2-3 a vyneseny v I-t diagramu spalin na Obr. 1.

$$I_{SPr} = p_{CO_2r} \cdot i_{CO_2} + p_{N_2r} \cdot i_{N_2} + p_{Ar} \cdot i_{Ar} + p_{H_2Or} \cdot i_{H_2O} + p_{VZr} \cdot c \cdot t \quad (2.4.8)$$

Poměrové objemové složení dílčích složek spalin s uvažováním recirkulace spalin

$$O_{CO_2r} = O_{SP} \cdot p_{CO_2} + O_{SP} \cdot p_{CO_2} \cdot r = 10,867 \cdot 0,091 + 10,867 \cdot 0,091 \cdot 0,12$$

$$O_{CO_2r} = 1,110 m^3 / m^3 \quad (2.4.9)$$

$$p_{CO_2r} = \frac{O_{CO_2r}}{O_{SPr}} = \frac{1,110}{12,171} = 0,091 \quad (2.4.10)$$

$$O_{N_2r} = O_{SP} \cdot p_{N_2} + O_{SP} \cdot p_{N_2} \cdot r = 10,867 \cdot 0,657 + 10,867 \cdot 0,657 \cdot 0,12$$

$$O_{N_2r} = 7,994 m^3 / m^3 \quad (2.4.11)$$

$$p_{N_2r} = \frac{O_{N_2r}}{O_{SPr}} = \frac{7,994}{12,171} = 0,657 \quad (2.4.12)$$

$$O_{Arr} = O_{SP} \cdot p_{Ar} + O_{SP} \cdot p_{Ar} \cdot r = 10,867 \cdot 0,008 + 10,867 \cdot 0,008 \cdot 0,12$$

$$O_{Arr} = 0,094 m^3 / m^3 \quad (2.4.13)$$

$$p_{Arr} = \frac{O_{Arr}}{O_{SPr}} = \frac{0,094}{12,171} = 0,008 \quad (2.4.14)$$

$$O_{H_2Or} = O_{SP} \cdot p_{H_2O} + O_{SP} \cdot p_{H_2O} \cdot r = 10,867 \cdot 0,201 + 10,867 \cdot 0,201 \cdot 0,12$$

$$O_{H_2Or} = 2,45 m^3 / m^3 \quad (2.4.15)$$

$$p_{H_2Or} = \frac{O_{H_2Or}}{O_{SPr}} = \frac{2,45}{12,171} = 0,039 \quad (2.4.16)$$

$$O_{VZr} = (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin} \cdot r$$

$$O_{VZr} = (1,05 - 1) \cdot 9,398 + (1,05 - 1) \cdot 9,398 \cdot 0,12 = 0,526 m^3 / m^3 \quad (2.4.17)$$

$$p_{VZr} = \frac{O_{VZr}}{O_{SPr}} = \frac{0,526}{12,171} = 0,091 \quad (2.4.18)$$

3 Tepelná bilance kotle

3.1 Teplo přivedené do kotle

Palivo není ohříváno cizím zdrojem ani neobsahuje vodu, tudíž je fyzické teplo paliva $i_p=0$. Přiváděný spalovací vzduch není předehříván vnějším zdrojem, jeho teplota na vstupu do OVZ je 30 °C, tudíž teplo ohřátí vzduchu $Q_{vzv}=0$. Teplo přivedené do kotle na 1 m³ plynného paliva je tedy:

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{vzv} = 34,3 + 0 + 0 = 34,3 \text{ MJ} / \text{m}^3 \quad (3.1.1)$$

3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Ztráty kotle jsou nežádoucí a snižují tepelnou účinnost kotle. Je tedy naším cílem, aby tyto ztráty byly co nejmenší.

Pro klasický výpočet se uvažují ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal), ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal), ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování, ztráta sdílením tepla do okolí a ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta).

Jelikož je v našem případě palivem ZP, uvažujeme pouze ztráty hořlavinou ve spalinách, sdílením tepla do okolí a fyzickým teplem spalin.

3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách

Ztráty vychází z nedokonalého spalování paliva a obsahu hořlavých složek ve spalinách, převážně CO. Hodnota byla na základě doporučení konzultanta volena.

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

3.2.2 Ztráta sdílením tepla do okolí

Velikost ztráty je závislá na výkonu kotle a použitém palivu. Hodnota byla na základě doporučení konzultanta volena.

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

3.2.3 Ztráta citelným teplem spalin

Tato ztráta se v účinnosti projevuje nejcitelněji. Výsledná hodnota ztráty se odvíjí od teploty na konci kotle a součinitele přebytku vzduchu.

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích $Z_c=0$, entalpie spalin se určí z I-t diagramu spalin na Obr. 1 nebo interpolací z tabulky Tab. 2-3 pro zpočátku volenou teplotu 119 °C.

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_p^p} = (100 - 0) \cdot \frac{1781,24 - 390,76}{34300} = 4,05\% \quad (3.2.1)$$

Entalpie vzduchu s přebytkem vzduchu za kotlem α_k

$$I_{VZ} = \alpha_k \cdot I_{VZ \min} = 1,05 \cdot 372,16 = 390,77 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (3.2.2)$$

Minimální entalpie vzduchu

$$I_{VZ \min} = O_{VZ \min} \cdot c \cdot t = 9,398 \cdot 1,32 \cdot 30 = 372,16 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (3.2.3)$$

3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva**Výrobní teplo páry**

V kotli není žádný mezipřehřívák ani odběr syté páry, pro zjednodušení výpočtu neuvažujeme ani s odluhem (po dohodě s konzultantem). $M_{mp}=M_o=M_{op}=0$.

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_{mp} \cdot (\Delta i) + M_o \cdot (\Delta i) + M_{op} \cdot (\Delta i) \quad (3.3.1)$$

$$Q_v = 58,33 \cdot (3438,23 - 727,56) + 0 + 0 + 0 = 158,12 \text{ MW}$$

Množství paliva

Množství paliva přivedené do kotle M_p se rovná množství skutečně spálenému M_{pv} , neboť nevzniká ztráta mechanickým nedopalem Z_c .

$$M_p = M_{pv} = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{158122}{34300 \cdot \frac{94,95}{100}} = 4,86 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (3.3.2)$$

4 Výpočet spalovací komory

4.1 Spalovací komora

Rozměry spalovací komory jsou již dány původním výkresem kotle, pouze její výška byla příčně upravena (zmenšena), aby bylo dosaženo přijatelné teploty na konci ohniště.

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{4,86 \cdot 34300}{603,74} = 275,85 \text{ kW} / \text{m}^3 \quad (4.1.1)$$

Objem ohniště

Do objemu ohniště je třeba přičíst objem spodní zešíkmené části (dna) a odečíst část výstupku (nosu) v horní části.

$$V_o = V_{abh} + V_{vwb} - V_{yub} \\ V_o = 6,84 \cdot 7,416 \cdot 12 + \frac{6,84}{2} \cdot 0,42 \cdot 7,416 - 1,5 \cdot 0,6 \cdot 2,34 \cdot 7,416 = 603,74 \text{ m}^3 \quad (4.1.2)$$

Průřezové zatížení ohniště

$$q_f = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{f} = \frac{4,86 \cdot 34,3}{6,84 \cdot 7,416} = 3,28 \text{ MW} / \text{m}^2 \quad (4.1.3)$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

Úhlový součinitel $x_i=1$ pro membránové stěny i pro výstupní otvor, rovnici (4.1.4) lze tedy počítat zjednodušeně. Z hodnoty celkové plochy stěn ohniště jsou odečteny plochy hořáků a revizních otvorů.

$$F_{ús} = \sum F_i \cdot x_i = (F_{boky} + F_{cela} + F_{dno} + F_{nos} + F_{výst} - F_{hoř} - F_{otvor}) \cdot x_i \\ F_{ús} = (159,95 + 169,08 + 44,45 + 50,73 - 7,07 - 1,44) \cdot 1 = 416,31 \text{ m}^2 \quad (4.1.4)$$

$$F_{boky} = n_b \cdot \left(h \cdot A - l_b \cdot l_n - l_b \cdot \frac{l_n}{2} \right) = 2 \cdot \left(12 \cdot 6,84 - 0,6 \cdot 2,34 - 0,6 \cdot \frac{2,34}{2} \right)$$

$$F_{boky} = 159,95 \text{ m}^2$$

$$F_{cela} = n_c \cdot h \cdot B - l_c \cdot B = 2 \cdot 12 \cdot 7,416 - 1,2 \cdot 7,416 = 169,08 \text{ m}^2$$

$$F_{dno} = n_d \cdot w \cdot B = 2 \cdot 3 \cdot 7,416 = 44,45 \text{ m}^2$$

$$F_{výst} = A \cdot B = 6,84 \cdot 7,416 = 50,73 \text{ m}^2$$

$$F_{hoř} = n_h \cdot \pi \cdot \frac{D_h^2}{4} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{1,5^2}{4} = 7,07 \text{ m}^2$$

$$F_{otvor} = n_{ot} \cdot a_{ot} \cdot b_{ot} = 4 \cdot 0,6 \cdot 0,6 = 1,44 \text{ m}^2$$

4.2 Tepelný výpočet ohniště

Cílem tepelného výpočtu ohniště je určit teplotu spalin na konci ohniště T_0 , respektive ϑ_0 . Tato teplota se na počátku výpočtu odhadne, a pokud se s vypočtenou hodnotou neshoduje, navrhne se teplota nová a výpočet se opakuje. V následujícím výpočtu je počítáno s teplotou získanou po několika provedených iteracích.

4.2.1 Teplota spalin na výstupu z ohniště

Rovnice pro výpočet teploty na konci ohniště vychází z rovnice pro poměrnou teplotu spalin na výstupu z ohniště.

$$\Theta_0 = \frac{T_0}{T_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} \Rightarrow \vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 237,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (4.2.1)$$

$$\vartheta_0 = \frac{2006,67 + 237,15}{1 + 0,37 \cdot \left(\frac{0,584}{0,69}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1225,30^\circ\text{C}$$

4.2.2 Součinitel M

Charakterizuje polohu maximální teploty plamene, jeho hodnota je závislá na použitých hořácích a jejich umístění ve stěnách.

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_0 = 0,54 - 0,2 \cdot 0,88 = 0,36 \quad (4.2.2)$$

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

$$x_0 = x_h + \Delta x = 0,28 + 0,6 = 0,88 \quad (4.2.3)$$

Poměrná výška hořáků

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

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{3,5}{12,42} = 0,28 \quad (4.2.4)$$

Hořáky jsou čtyři, o stejném výkonu, umístěny ve dvou řadách.

$$h_h = \frac{n_1 \cdot h_h^I + n_2 \cdot h_h^{II}}{n_1 + n_2} = \frac{2 \cdot 2 + 2 \cdot 5}{2 + 2} = 3,5\text{m} \quad (4.2.5)$$

Při spalování plynu v nízkoemisních hořácích se zavádí oprava Δx , která je závislá na sníženém přebytku vzduchu α_h . Toto podstechiometrické množství jsem zvolil 0,7.

$$\Delta x = 2 \cdot (1 - \alpha_h) = 2(1 - 0,7) = 0,6 \quad (4.2.6)$$

4.2.3 Boltzmanovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot F_{st} \cdot T_a^3} \quad (4.2.7)$$

$$B_o = \frac{0,995 \cdot 4,86 \cdot 17,24}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,6 \cdot 416,31 \cdot (273,15 + 2006,67)^3} = 0,79$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{so}}{\eta_k + Z_{so}} = 1 - \frac{0,5}{94,95 + 0,5} = 0,995 \quad (4.2.8)$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp}} \cdot c = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{36269,3 - 22797,9}{2006,7 - 1225,3} = 17,24 \text{ kJ} / \text{m}^3 \cdot \text{K} \quad (4.2.9)$$

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - Z_{co} - Z_c - Z_{fs}}{100 - Z_c} + Q_{vz} - Q_{vzv} + r \cdot I_{SPod} \quad (4.2.10)$$

$$I_u = 34300 \cdot \frac{100 - 0,5 - 0 - 0}{100 - 0} + 1927,02 - 0 + 0,12 \cdot 1781,24 = 36269,3 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

Teplo přivedené do ohniště se vzduchem

Teplota ohřátého vzduchu je volena 147 °C, samotný výpočet OVZ je pak proveden v kapitole 16.

$$Q_{vz} = \alpha_0 \cdot I_{VZ \min}^* = 1,05 \cdot 1835,25 = 1927,02 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (4.2.11)$$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

Součinitel zanesení stěn ohniště pro plyn a membránové stěny $\zeta = 0,6$.

$$\psi = x \cdot \zeta = 1 \cdot 0,6 = 0,6 \quad (4.2.12)$$

4.2.4 Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi} = \frac{0,45}{0,45 + (1 - 0,45) \cdot 0,6} = 0,58 \quad (4.2.13)$$

Efektivní stupeň černosti plamene

Součinitel charakterizuje podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene. Pro spalování plyných a kapalných paliv, objemové zatížení menší než 400 kW/m³ a jednoprostorové ohniště platí rovnice (4.2.14), kde $m=0,1$.

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,1 \cdot 0,74 + (1 - 0,1) \cdot 0,42 = 0,45 \quad (4.2.14)$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{ns} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,04 \cdot 0,029 \cdot 5,22} = 0,42 \quad (4.2.15)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

- objemová část tříatomových plynů r_{sp} je již známa z rovnice (2.2.6)

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (4.2.16)$$

$$k = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,029 \cdot 5,22}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1225,3 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,293$$

$$k = 1,041 / m \cdot MPa$$

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,293 = 0,029 MPa \quad (4.2.17)$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{603,74}{416,31} = 5,22 m \quad (4.2.18)$$

Stupeň černosti svítivé části plamene

$$a_{sv} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,58 \cdot 0,029 \cdot 5,22} = 0,74 \quad (4.2.19)$$

Součinitel zeslabení sálání svítivé části plamene

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_c = 1,03 + 1,55 = 2,581 / m \cdot MPa \quad (4.2.20)$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - \alpha_0) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_0}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (4.2.21)$$

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - 1,05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1225,3 + 273,15}{1000} \right) \cdot 2,86 = 1,551 / m \cdot MPa$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku (pro plyn)

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} \cdot C_m H_n = 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 94,31 + \frac{2}{6} \cdot 0,51 + \frac{3}{8} \cdot 0,11 + \frac{4}{10} \cdot 0,1 \right) = 2,86 \quad (4.2.22)$$

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_0) = 0,99 \cdot (36269,3 - 22797,9) = 13400,8 kJ / m^3 \quad (4.2.23)$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\frac{Q_s}{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_0)}{F_{ús}} = \frac{0,99 \cdot 4,86 \cdot (36269,3 - 22797,9)}{416,31} = 156,29 kW / m^2 \quad (4.2.24)$$

5 Bilanční výpočet teplosměnných ploch ze strany média

5.1 Tlak napájecí vody

Prouděním média v trubkách vznikají tlakové ztráty, se kterými je nutné počítat již při prvotním návrhu a rozložení výkonů na jednotlivé plochy. Tlak napájecí vody je vyjádřen v rovnici (5.1.1). Tlakové ztráty jednotlivých ploch byly předběžně stanoveny odborným odhadem.

$$p_{nv} = p_{pp} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{DP} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{EKO} = 13,63 + 0,3 + 0,55 + 0,75 + 0,5 = 15,73 \text{ Mpa} \quad (5.1.1)$$

5.2 Dílčí výkony jednotlivých ploch

Celkový výkon na straně média je znám z rovnice (3.3.1). Požadované výkony dílčích ploch se vypočtou ze známých teplot média podle rovnice (5.2.1). Nutné je však brát zřetel na vstřiky, součet vstřiků byl volen 12 % napájecí vody. Teplota vody na výstupu z EKA byla zvolena 257 °C.

$$Q_b = M_{pp} \cdot (i_2 - i_1) \quad (5.2.1)$$

$$Q_b^{EKO} = 0,88 \cdot 58,33 \cdot (1119,39 - 727,56) = 20,11 \text{ MW} \Rightarrow \frac{20113,95}{4,86} = 4142,62 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

$$Q_b^{výp} = 0,88 \cdot (2604,22 - 1119,39) = 76,2 \text{ MW} \Rightarrow \frac{76221,12}{4,86} = 15698,3 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

$$Q_b^P = Q_v - Q_b^{EKO} - Q_b^{výp} = 158,12 - 20,11 - 76,22 = 61,79 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \frac{61787,37}{4,86} = 12725,58 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

5.2.1 EKO

Ekonomizér tvoří část původní (EKO2) a část navrhovaná (EKO1). Původní se skládá ze dvou membránových stěn a svazku trubek. Navrhované dodatkové EKO1 tvoří svazek trubek. Celé EKO je umístěno v druhém tahu kotle.

EKO1 (navrhované)

	t [°C]	p [Mpa]	i [kJ/kg]
vstup	170	15,73	727,56
výstup	240	15,63	1039,25

Přijatý výkon v EKO1

$$Q_b = \frac{M_{nv}}{M_{pv}} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{0,88 \cdot 58,33}{4,86} \cdot (1039,25 - 727,56) = 3295,32 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (5.2.2)$$

EKO2 (původní)

	t [°C]	p [Mpa]	i [kJ/kg]
vstup	240	15,63	1039,25
výstup	257	15,23	1119,39

Přijatý výkon v EKO2

$$Q_b = \frac{M_{nv}}{M_{pv}} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{0,88 \cdot 58,33}{4,86} \cdot (1119,39 - 1039,25) = 715,92 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (5.2.3)$$

5.2.2 Výparník

Ve výparníku dochází k fázové přeměně vody na páru. Jeho převážná část zasahuje do oblasti ohniště. Při výpočtu výkonu se musí počítat i s nedohřevem z výstupu EKA.

5.2.3 Přehříváky

Součástí kotle jsou tři přehříváky páry. Přehřívák P1, do kterého je zahrnut stropní přehřívák, ZTR přehříváku P11, strop a stěny obratové komory, mříž 3, přehřívák P11 a P12. Dále deskový přehřívák P2DP složený ze čtyř desek vstupních a čtyř výstupních s jejich ZTR. A nakonec výstupní přehřívák P3 složený ze sekcí P31 a P32. Vstříky jsou zavedeny před (7 %) a za (5 %) P2DP.

Přehřívák P1

	t [°C]	p [Mpa]	i [kJ/kg]
vstup	343,38	15,23	2604,22
výstup	443,90	14,48	3147,38

Bilance prvního vstříku

$$i_{2P1} = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot i_{1P2DP} - 0,07 \cdot M_{nv} \cdot i_{nv}}{0,88 \cdot M_{pp}} \quad (5.2.4)$$

$$i_{2P1} = \frac{0,95 \cdot 58,33 \cdot 2969,07 - 0,07 \cdot 58,33 \cdot 727,56}{0,88 \cdot 58,33} = 3147,38 \text{ kJ} / \text{kg}$$

Přijatý výkon v přehříváku P1

$$Q_b^{P1} = \frac{M_{pp}}{M_{pv}} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{0,88 \cdot 58,33}{4,86} \cdot (3147,38 - 2604,22) = 5742,53 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (5.2.5)$$

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

Přehřívák P2DP

	t [°C]	p [Mpa]	i [kJ/kg]
vstup	395	14,48	2969,07
výstup	486,40	13,93	3286,16

Bilance druhého vstříku

$$i_{2P2DP} = \frac{M_{pp} \cdot i_{1P3} - 0,05 \cdot M_{nv} \cdot i_{nv}}{0,95 \cdot M_{pp}} \quad (5.2.6)$$

$$i_{2P2DP} = \frac{58,33 \cdot 3158,23 - 0,05 \cdot 58,33 \cdot 727,56}{0,95 \cdot 58,33} = 3286,16 \text{ kJ / kg}$$

Přijatý výkon v přehříváku P2DP

$$Q_b^{P2DP} = \frac{M_{pp}}{M_{pv}} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{0,95 \cdot 58,33}{4,86} \cdot (3286,16 - 2969,07) = 3619,08 \text{ kJ / m}^3 \quad (5.2.7)$$

Přehřívák P3

	t [°C]	p [Mpa]	i [kJ/kg]
vstup	444,14	13,93	3158,23
výstup	540	13,63	3438,23

Přijatý výkon v přehříváku P3

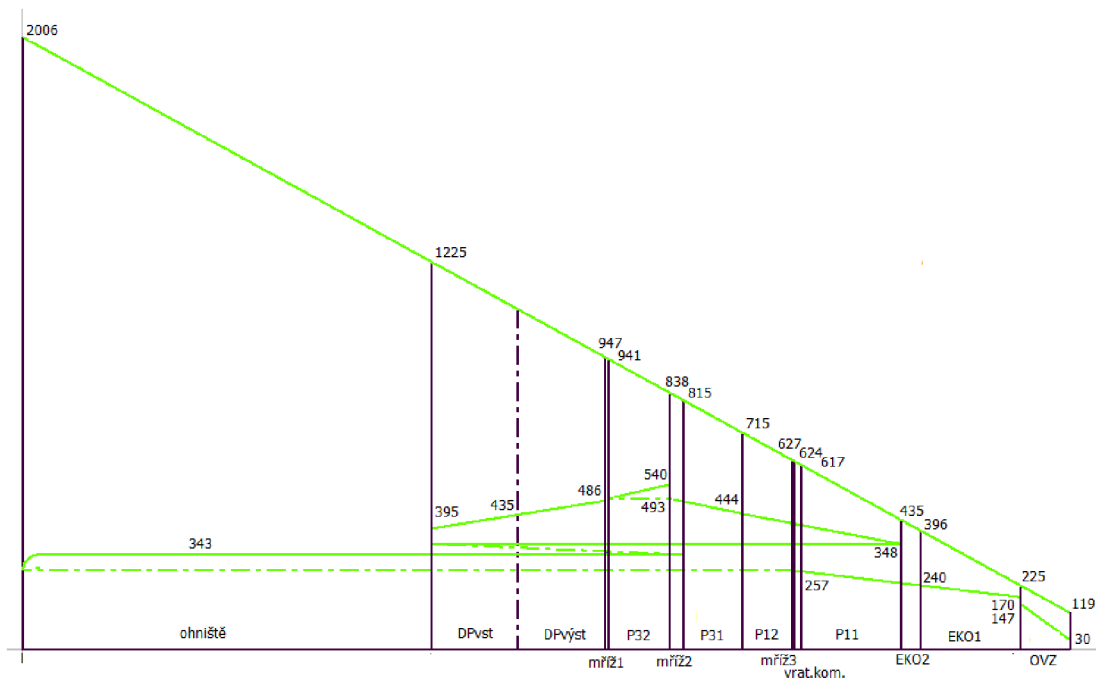
$$Q_b^{P3} = \frac{M_{pp}}{M_{pv}} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{58,33}{4,86} \cdot (3438,23 - 3158,23) = 3363,98 \text{ kJ / m}^3 \quad (5.2.8)$$

Součet přijatého výkonu ve všech přehřívácích

$$Q_b = Q_b^{P1} + Q_b^{P2DP} + Q_b^{P3} = 5742,53 + 3619,08 + 3363,98 = 12725,59 \text{ kJ / m}^3 \quad (5.2.9)$$

5.3 Pilový diagram

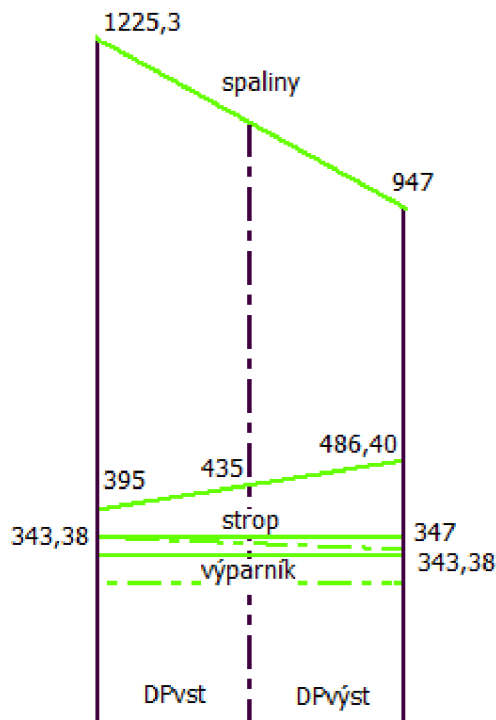
Pilový diagram na Obr. 2 znázorňuje rozložení teplot spalin a média na jednotlivých teplosměnných plochách kotle. Číselné hodnoty v diagramu jsou v °C.



Obr. 2 Pilový diagram

6 Oblast deskového přehříváku

Oblast se nachází nad ohništěm v prvním tahu kotle. Spaliny předávají výkon několika paralelním plochám. A to deskovému přehříváku, složenému ze 4 desek vstupních (středové), 4 výstupních (krajní) a jejich závěsných trubek, části výparníku na stěnách tahu a části stropního přehříváku.



Obr. 3 Oblast DP (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

hloubka	A	4,5 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	8,995 m

6.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (22797,90 - 17108,83) = 5659,26 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (6.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{947 + 1225,3}{2} = 1086,15^\circ\text{C} \quad (6.1.2)$$

$$\lambda = 0,102 \text{ W / mK}$$

$$\nu = 0,000169 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,54$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15} \right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{41,81} \cdot \left(1 + \frac{1086,15}{273,15} \right) = 7,89 \text{ m / s} \quad (6.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 32,28 \cdot 59,33}{32,28 + 59,33} = 41,81 \text{ m}^2 \quad (6.1.4)$$

Vstupní a výstupní průřezy – rozměry jsou odečteny z výkresu

$$F_1 = (4,5 \cdot 7,416) - (8 \cdot 0,038 \cdot 3,6) = 32,28 \text{ m}^2 \quad (6.1.5)$$

$$F_2 = (8 \cdot 7,416) = 59,33 \text{ m}^2$$

6.2 Deskový přehřívák P2DP výstupní (krajní)

P2DP výstupní

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,028 m
příčná rozteč	s ₁	0,792 m
podélná rozteč	s ₂	0,043 m
počet trubek	n _{tr}	18
počet desek	z	4

ZTR P2DP

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek na desku	n _{ztr}	4

Zohlednění ZTR ve výpočtu P2DP

$$D = \frac{0,038 \cdot 18 + 0,032 \cdot 4}{18 + 4} = 0,037m$$

$$tl = \frac{0,005 + 0,0036}{2} = 0,0043m$$

$$d = 0,037 - 2 \cdot 0,0043 = 0,028m$$
(6.2.1)

6.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{99,41} + \frac{1}{4205,95}} = 82,55W / m^2K$$
(6.2.2)

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,85 \cdot (38,56 + 78,39) = 99,41W / m^2K$$
(6.2.3)

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro desky

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

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,67 \cdot \frac{0,102}{0,037} \cdot \left(\frac{7,89 \cdot 0,037}{0,000169} \right)^{0,65} \cdot 0,54^{0,33} = 38,56W / m^2K$$
(6.2.4)

Oprava

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

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,792}{0,037} = 21,45; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,043}{0,037} = 1,17$$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,17}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,67$$
(6.2.5)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,31 \cdot (1086,14 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{485,70 + 273,15}{1086,14 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{485,70 + 273,15}{1086,14 + 273,15}} \quad (6.2.6)$$

$$\alpha_s = 78,39 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,366} = 0,306 \quad (6.2.7)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (7,28 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 1,73 = 0,366 \quad (6.2.8)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (6.2.9)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 1,73}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1086,15 + 273,15}{1000} \right) = 7,28$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{4,5 \cdot 7,416 \cdot 8,995}{(2 \cdot 171,2 + 2 \cdot (4,5 \cdot 7,416 + 4,5 \cdot 8,995 + 7,416 \cdot 8,995))} = 1,73 \text{ m} \quad (6.2.10)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 460,70 + 25 = 485,70 \text{ °C} \quad (6.2.11)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25 \text{ °C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

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

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0774}{0,028} \cdot \left(\frac{20,48 \cdot 0,028}{27,507 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0205} \right)^{0,8} \cdot 1,09^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 4205,95 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$
(6.2.12)

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{435 + 486,4}{2} = 460,70^\circ \text{C}$$

$$p_{st}^m = \frac{13,93 + 14,28}{2} = 14,11 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,0774 \text{ W / mK}$$

$$\text{Pr} = 1,09$$

$$\eta = 27,507 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$$

$$\nu = 0,0205 \text{ m}^3 / \text{kg}$$
(6.2.13)

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,95 \cdot 58,33}{0,0542} \cdot 0,0205 = 20,48 \text{ m / s}$$
(6.2.14)

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (n_{rr} + n_{zrr}) \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot (18 + 4) \cdot 4 = 0,0542 \text{ m}^2$$
(6.2.15)

6.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{790,30 - 460,60}{\ln \left(\frac{790,30}{460,60} \right)} = 610,69^\circ \text{C}$$
(6.2.16)

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 1225,30 - 435 = 790,30^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 947 - 486,40 = 460,60^\circ \text{C}$$
(6.2.17)

6.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech desek

$$S = z \cdot S_1 \cdot x = 4 \cdot 45,06 \cdot 0,95 = 171,23 m^2 \quad (6.2.18)$$

Plocha jedné desky

$$S_1 = 2 \cdot (0,738 + 0,038) \cdot 29,034 = 45,06 m^2 \quad (6.2.19)$$

6.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P2DP_{výst}} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{82,55 \cdot 171,23 \cdot 610,69}{4,86 \cdot 1000} = 1777,83 kJ / m^3 \quad (6.2.20)$$

6.3 Deskový přehřívák P2DP vstupní (středové)

Výsledné sdílené teplo je přibližně stejné jako u výstupního DP. Součinitel prostupu tepla se nepatrně změní, protože je jiná střední hodnota média.

P2DP vstupní

vnější průměr trubky	D	0,038	m
tloušťka stěny	tl.	0,0038	m
vnitřní průměr trubky	d	0,036	m
příčná rozteč	s ₁	0,792	m
podélná rozteč	s ₂	0,043	m
počet trubek	n _{tr}	18	
počet desek	z	4	

ZTR P2DP

vnější průměr trubky	D	0,032	m
tloušťka stěny	tl.	0,004	m
vnitřní průměr trubky	d	0,024	m
počet trubek na desku	n _{ztr}	4	

Zohlednění ZTR ve výpočtu P2DP

- stejný případ jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.1)

6.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{96,43} + \frac{1}{4642,78}} = 80,30 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (6.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,85 \cdot (38,56 + 74,89) = 96,43 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (6.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro desky

- součinitel je stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.4)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (6.3.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,31 \cdot (1086,14 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{440 + 273,15}{1086,14 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{440 + 273,15}{1086,14 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 74,89 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.7)
Optická hustota spalin
- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.8)
Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.9)
Efektivní tloušťka sálové vrstvy
- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.10)
Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 415 + 25 = 440^\circ \text{C} \quad (6.3.4)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (6.3.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0771}{0,028} \cdot \left(\frac{20,48 \cdot 0,028}{25,516 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0175} \right)^{0,8} \cdot 1,22^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 4642,78 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{395 + 435}{2} = 415^\circ \text{C}$$

$$p_{st}^m = \frac{14,48 + 14,28}{2} = 14,38 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,0771 \text{ W} / \text{mK} \quad (6.3.6)$$

$$\text{Pr} = 1,22$$

$$\eta = 25,516 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$$

$$\nu = 0,028 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,95 \cdot 58,33}{0,0542} \cdot 0,0175 = 17,55 \text{ m} / \text{s} \quad (6.3.7)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (n_r + n_{zr}) \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot (18 + 4) \cdot 4 = 0,0542 \text{ m}^2 \quad (6.3.8)$$

6.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{830,30 - 512}{\ln \left(\frac{830,30}{512} \right)} = 658,37^\circ \text{C} \quad (6.3.9)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 1225,30 - 395 = 830,30^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 947 - 435 = 512^\circ \text{C} \quad (6.3.10)$$

6.3.3 Výhřevná plocha

- výhřevná plocha je stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.18)

6.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P2DP_{vst}} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{80,30 \cdot 171,23 \cdot 658,37}{4,86 \cdot 1000} = 1864,46 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (6.3.11)$$

6.4 Stěny (část výparníku)

Výparník

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m
počet trubek	n _{tr}	334
délka trubky	l _{tr}	8,995 m

6.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 78,45 = 66,68 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (6.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 8,71 + 69,74 = 78,45 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (6.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (6.4.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,102}{1,96} \cdot \left(\frac{7,89 \cdot 1,96}{169 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,54^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 8,71 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 41,81}{85,26} = 1,96 \text{ m} \quad (6.4.4)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (4,5 + 7,416) + 2 \cdot 8 \cdot (0,038 + 3,6) + 4 \cdot \pi \cdot 0,032 \cdot 8 = 85,26 \text{ m} \quad (6.4.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,31 \cdot (1086,14 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{368,38 + 273,15}{1086,14 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{368,38 + 273,15}{1086,14 + 273,15}} \quad (6.4.6)$$

$$\alpha_s = 69,74 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.7)

Optická hustota spalin

- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.8)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.9)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.10)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 343,38 + 25 = 368,38^\circ \text{C} \quad (6.4.7)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Střední teplota média

- výparník, stejná teplota vstupu i výstupu

$$t_{st}^m = 343,38^\circ \text{C} \quad (6.4.8)$$

6.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{881,92 - 603,62}{\ln\left(\frac{881,92}{603,62}\right)} = 734^\circ \text{C} \quad (6.4.9)$$

Souproudé uspořádání

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 1225,30 - 343,38 = 881,92^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 947 - 343,38 = 603,62^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{6.4.10}$$

6.4.3 Výhřevná plocha

Plocha všech stěn v oblasti

$$S = 8,995 \cdot 7,416 + 1 \cdot 7,416 + 2 \cdot 4,5 \cdot 8,995 = 155,08\text{m}^2\tag{6.4.11}$$

6.4.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{\text{výp}} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{66,68 \cdot 155,08 \cdot 734}{4,86 \cdot 1000} = 1563,21\text{kJ} / \text{m}^3\tag{6.4.12}$$

6.5 Strop nad DP (část P1)

Strop P1

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	102
délka trubky	l_{tr}	4,5 m

6.5.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{78,57} + \frac{1}{11033,71}} = 66,31\text{W} / \text{m}^2\text{K}\tag{6.5.1}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 8,71 + 69,86 = 78,57\text{W} / \text{m}^2\text{K}\tag{6.5.2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

- součinitel je stejný jako u stěn výparníku, viz rovnice (6.4.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,31 \cdot (1086,14 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{370,19 + 273,15}{1086,14 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{370,19 + 273,15}{1086,14 + 273,15}} \quad (6.5.3)$$

$$\alpha_s = 69,86 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.7)
Optická hustota spalin
- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.8)
Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
- stejný jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.9)
Efektivní tloušťka sálavé vrstvy
- stejná jako u výstupního DP, viz rovnice (6.2.10)
Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 345,19 + 25 = 370,19^\circ \text{C} \quad (6.5.4)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

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

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,1145}{0,024} \cdot \left(\frac{11,58 \cdot 0,024}{22,94 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0104}\right)^{0,8} \cdot 2,37^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11033,71 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (6.5.5)$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$\begin{aligned}
 t_{st}^m &= \frac{343,38 + 347}{2} = 345,19^\circ\text{C} \\
 p_{st}^m &= \frac{15,23 + 15,22}{2} = 15,225\text{MPa} \\
 \lambda &= 0,1145\text{W} / \text{mK} \\
 \text{Pr} &= 2,37 \\
 \eta &= 22,94 \cdot 10^{-6}\text{Pas} \\
 \nu &= 0,0104\text{m}^3 / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{6.5.6}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,046} \cdot 0,0104 = 11,58\text{m} / \text{s}
 \tag{6.5.7}$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 102 = 0,046\text{m}^2
 \tag{6.5.8}$$

6.5.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{881,92 - 600}{\ln\left(\frac{881,92}{600}\right)} = 731,93^\circ\text{C}
 \tag{6.5.9}$$

Souproudé uspořádání

$$\begin{aligned}
 \Delta t_v &= 1225,30 - 343,38 = 881,92^\circ\text{C} \\
 \Delta t_m &= 947 - 347 = 600^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{6.5.10}$$

6.5.3 Výhřevná plocha

Plocha všech stěn v oblasti

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot 4,5 \cdot 102 = 46,14\text{m}^2
 \tag{6.5.11}$$

6.5.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{strop} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{66,31 \cdot 46,14 \cdot 731,93}{4,86 \cdot 1000} = 461,28 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (6.5.12)$$

6.6 Celková bilance oblasti P2DP

$$Q_v = Q_v^{P2DPvyst} + Q_v^{P2DPvst} + Q_v^{výp} + Q_v^{strop} \quad (6.6.1)$$

$$Q_v = 1777,83 + 1864,46 + 1563,21 + 461,28 = 5666,79 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{5659,26 - 5666,79}{5659,26} \cdot 100 = -0,13\% \quad (6.6.2)$$

Odchylka se pohybuje v normě 2 %, proto zle považovat volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

7 Oblast mříže 1

Oblast je tvořena pouze mříží, a to jednou řadou trubek, rozvolněnou zadní stěnou výparníku.

Rozměry počítané oblasti z výkresu

hloubka	A	8 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	0,06 m

7.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (17108,83 - 16987,69) = 120,51 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (7.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{947 + 941}{2} = 944^\circ\text{C} \quad (7.1.2)$$

$$\lambda = 0,0938 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,000147 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,56$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15} \right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{46,85} \cdot \left(1 + \frac{944}{273,15} \right) = 6,28 \text{ m} / \text{s} \quad (7.1.3)$$

Průřez spalin

$$F_{sp} = A \cdot (B - n_{tr} \cdot D) = 8 \cdot (7,416 - 26 \cdot 0,06) = 46,85 \text{ m}^2 \quad (7.1.4)$$

7.2 Mříž 1

Výparník

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m
počet trubek	n_{tr}	26
délka trubky	l_{tr}	8 m
příčná rozteč	s_1	0,288 m
podélná rozteč	s_2	0 m

7.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 29,55 = 25,12 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (7.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 2,38 + 27,17 = 29,55 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (7.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,063 \cdot \frac{0,0938}{0,06} \cdot \left(\frac{6,28 \cdot 0,06}{147 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,56^{0,33} = 2,38 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (1 - 2) = 0,9$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,288}{0,06} = 4,8; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0}{0,06} = 0 \quad (7.2.4)$$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 4,8 - 3) \cdot \left(1 - \frac{0}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,063$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,15 \cdot (944 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{368,38 + 273,15}{944 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{368,38 + 273,15}{944 + 273,15}} \quad (7.2.5)$$

$$\alpha_s = 27,17 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,168} = 0,15 \quad (7.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (6,16 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,27 = 0,168 \quad (7.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,27}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{944 + 273,15}{1000} \right) = 20,88 \quad (7.2.8)$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{0,06 \cdot 7,416 \cdot 8}{46,85} = 0,27 \text{ m} \quad (7.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 343,38 + 25 = 368,38^\circ \text{C} \quad (7.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

7.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{603,62 - 597,62}{\ln\left(\frac{603,62}{597,62}\right)} = 600,62^\circ\text{C} \quad (7.2.11)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 947 - 343,38 = 881,92^\circ\text{C} \quad (7.2.12)$$

$$\Delta t_m = 941 - 343,38 = 603,62^\circ\text{C}$$

7.2.3 Výhřevná plocha

Plocha trubek mříže

$$S = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot l_{tr} = \pi \cdot 0,06 \cdot 26 \cdot 8 = 39,21\text{m}^2 \quad (7.2.13)$$

7.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{25,12 \cdot 39,21 \cdot 600,62}{4,86 \cdot 1000} = 121,83\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (7.2.14)$$

7.3 Celková bilance oblasti mříže 1

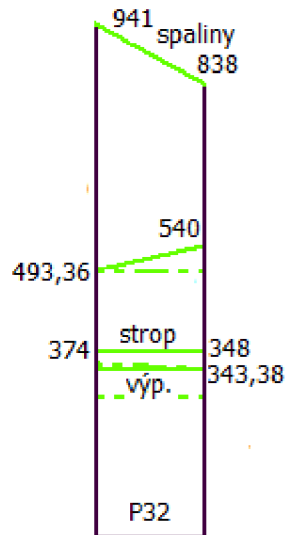
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{120,51 - 121,83}{120,51} \cdot 100 = -1,09\% \quad (7.3.1)$$

Odchylka se pohybuje v normě 5 %, proto lze považovat volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

8 Oblast přehříváku P32

Oblast se nachází za mříží 1 na začátku přechodového tahu. Spaliny předávají výkon několika paralelním plochám. A to přehříváku P32, který je tvořen svazkem hadů trubek, části výparníku na stěnách a části stropního přehříváku.



Obr. 4 Oblast P32 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

výška	A	8-4,2 m
šířka	B	7,416 m
hloubka	C	2,34 m

8.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (16987,69 - 14953,53) = 2023,50 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (8.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{941 + 838}{2} = 889,50^\circ\text{C} \quad (8.1.2)$$

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

$$\nu = 0,00013 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,56$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{34,08} \cdot \left(1 + \frac{889,50}{273,15}\right) = 8,24 \text{ m / s} \quad (8.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{46,85 + 21,32}{2} = 34,08 \text{ m}^2 \quad (8.1.4)$$

Vstupní a výstupní průřezy – rozměry jsou odečteny z výkresu

$$F_1 = 8 \cdot (7,416 - 26 \cdot 0,06) = 46,85 \text{ m}^2$$

$$F_2 = 4,2 \cdot (7,416 - 39 \cdot 0,06) = 21,32 \text{ m}^2 \quad (8.1.5)$$

8.2 Přehřívák P32

P32

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,022 m
příčná rozteč	s ₁	0,144 m
podélná rozteč	s ₂	0,15 m
počet trubek	n _{tr}	50
počet hadů	n _h	4
počet řad	z	8
délka trubky (hada)	l _{tr}	11,6 m

8.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{110,18} + \frac{1}{3404,62}} = 90,72 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (8.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 62,41 + 47,77 = 110,18 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (8.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekci

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (8.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot \frac{0,087}{0,032} \cdot \left(\frac{8,24 \cdot 0,032}{0,00013} \right)^{0,65} \cdot 0,56^{0,33} = 62,41 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

$$z \leq 10 \Rightarrow c_z = 0,91 + 0,01251 \cdot (8 - 2) = 0,99$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,144}{0,032} = 4,5; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,032} = 4,69 \quad (8.2.4)$$

$$c_s = 1$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,25 \cdot (889,50 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{541,68 + 273,15}{889,50 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{541,68 + 273,15}{889,50 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 62,41 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,282} = 0,25 \quad (8.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (13,03 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,74 = 0,282 \quad (8.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,74}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{889,5 + 273,15}{1000} \right) = 3,781 / m \cdot MPa$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,144 \cdot 0,15}{0,032^2} - 1 \right) = 0,74m \quad (8.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 516,68 + 25 = 541,68^\circ C \quad (8.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_i \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,081}{0,022} \cdot \left(\frac{18,31 \cdot 0,022}{29,89 \cdot 10^{-6} \cdot 0,024} \right)^{0,8} \cdot 1,01^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3404,62W / m^2 K$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{540 + 493,36}{2} = 516,68^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{13,63 + 13,78}{2} = 13,71MPa$$

$$\lambda = 0,081W / mK \quad (8.2.12)$$

$$Pr = 1,01$$

$$\eta = 29,89 \cdot 10^{-6} Pas$$

$$\nu = 0,024m^3 / kg$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{58,33}{0,076} \cdot 0,024 = 18,31m / s \quad (8.2.13)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,022^2}{4} \cdot 50 \cdot 4 = 0,076 m^2 \quad (8.2.14)$$

8.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{447,64 - 298}{\ln\left(\frac{447,64}{298}\right)} = 367,76^\circ C \quad (8.2.15)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 941 - 493,36 = 447,64^\circ C \quad (8.2.16)$$

$$\Delta t_m = 838 - 540 = 298^\circ C$$

8.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \pi \cdot 0,032 \cdot 11,6 \cdot 50 \cdot 4 = 233,23 m^2 \quad (8.2.17)$$

8.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P32} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{90,72 \cdot 233,23 \cdot 367,75}{4,86 \cdot 1000} = 1602,63 kJ / m^3 \quad (8.2.18)$$

8.3 Stěny (část výparníku)

Výparník

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m

8.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 53,64 = 45,59 W / m^2 K \quad (8.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_l = \alpha_k + \alpha_s = 14,66 + 38,98 = 53,64 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (8.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,087}{0,24} \cdot \left(\frac{8,24 \cdot 0,24}{130 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,56^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,66 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 34,08}{568} = 0,24 \quad (8.3.4)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot \left(\frac{(8+4,2)}{2} + 7,416 + 50 \cdot (0,032 + 5,4) \right) = 568 \text{ m} \quad (8.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.3.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,25 \cdot (889,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{368,38 + 273,15}{889,5 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{368,38 + 273,15}{889,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 38,98 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

- stejný jako u P32, viz rovnice (8.2.6)

Optická hustota spalin

- stejná jako u P32, viz rovnice (8.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u P32, viz rovnice (8.2.8)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

- stejná jako u P32, viz rovnice (8.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 343,38 + 25 = 368,38^\circ C \quad (8.3.7)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Střední teplota média

- výparník, stejná teplota vstupu i výstupu

$$t_{st}^m = 343,38^\circ C \quad (8.3.8)$$

8.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{597,62 - 494,62}{\ln\left(\frac{597,62}{494,62}\right)} = 544,50^\circ C \quad (8.3.9)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 941 - 343,38 = 597,62^\circ C \quad (8.3.10)$$

$$\Delta t_m = 838 - 343,38 = 494,62^\circ C$$

8.3.3 Výhřevná plocha

Plocha všech stěn v oblasti

$$S = \frac{8 + 4,2}{2} \cdot 2,34 \cdot 2 + 4,21 \cdot 7,416 = 59,78 m^2 \quad (8.3.11)$$

8.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{výp} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{45,59 \cdot 59,78 \cdot 544,50}{4,86 \cdot 1000} = 305,61 kJ / m^3 \quad (8.3.12)$$

8.4 Strop nad P32 (část P1)

Strop P1

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	102
délka trubky	l_{tr}	2,34 m

8.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{53,83} + \frac{1}{10248,22}} = 45,52 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (8.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 14,66 + 39,16 = 53,83 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (8.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

- součinitel je stejný jako u stěn výparníku, viz rovnice (8.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.4.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,25 \cdot (889,50 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{372,50 + 273,15}{889,50 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{372,50 + 273,15}{889,50 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 39,16 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u P32, viz rovnice (8.2.6)
Optická hustota spalin
- stejná jako u P32, viz rovnice (8.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u P32, viz rovnice (8.2.8)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

- stejná jako u P32, viz rovnice (8.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 347,50 + 25 = 372,50^\circ C \quad (8.4.4)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_l \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.4.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,110}{0,024} \cdot \left(\frac{11,99 \cdot 0,024}{22,97 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0108} \right)^{0,8} \cdot 2,16^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 10248,22 W / m^2 K$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{347 + 348}{2} = 347,50^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{15,21 + 15,22}{2} = 15,215 MPa$$

$$\lambda = 0,110 W / mK \quad (8.4.6)$$

$$\text{Pr} = 2,16$$

$$\eta = 22,97 \cdot 10^{-6} Pa s$$

$$\nu = 0,0108 m^3 / kg$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,046} \cdot 0,0108 = 11,99 m / s \quad (8.4.7)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 102 = 0,046 m^2 \quad (8.4.8)$$

8.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{594 - 490}{\ln\left(\frac{594}{490}\right)} = 540,33^\circ\text{C} \quad (8.4.9)$$

Souproudé uspořádání

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 941 - 347 = 594^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 838 - 348 = 490^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (8.4.10)$$

8.4.3 Výhřevná plocha

Plocha všech stěn v oblasti

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot 2,34 \cdot 102 = 24\text{m}^2 \quad (8.4.11)$$

8.4.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{strop} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{45,51 \cdot 24 \cdot 540,33}{4,86 \cdot 1000} = 121,54\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (8.4.12)$$

8.5 Celková bilance oblasti P32

$$\begin{aligned} Q_v &= Q_v^{P32} + Q_v^{výp} + Q_v^{strop} \\ Q_v &= 1602,64 + 305,61 + 121,54 = 2029,78\text{kJ} / \text{m}^3 \end{aligned} \quad (8.5.1)$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{2023,50 - 2029,78}{2023,50} \cdot 100 = -0,31\% \quad (8.5.2)$$

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

9 Oblast mříže 2

Oblast je tvořena pouze mříží, a to dvěma řadami trubek, rozvolněnou zadní stěnou výparníku. Ve skutečnosti je nad mříží ještě část stropního přehříváku, ale jeho plocha je tak malá, že se přičte k další oblasti stropu.

Rozměry počítané oblasti z výkresu

výška	A	4,2 m
šířka	B	7,416 m
hloubka	C	0,2 m

9.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (14953,53 - 14506,03) = 445,16 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (9.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{838 + 815}{2} = 826,5^\circ \text{C} \quad (9.1.2)$$

$$\lambda = 0,0859 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,00013 \text{ m}^2 / \text{s}$$

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

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{21,32} \cdot \left(1 + \frac{826,50}{273,15}\right) = 12,46 \text{ m} / \text{s} \quad (9.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - n_{tr} \cdot D) = 4,2 \cdot (7,416 - 39 \cdot 0,06) = 21,32 \text{ m}^2 \quad (9.1.4)$$

9.2 Mříž 2

Výparník

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m
počet trubek	n_{tr}	39
počet řad	z	2
délka trubky	l_{tr}	4,2 m
příčná rozteč	s_1	0,192 m
podélná rozteč	s_2	0,2 m

9.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 85,84 = 72,97 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (9.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 61,01 + 24,83 = 85,84 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (9.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0859}{0,06} \cdot \left(\frac{12,43 \cdot 0,06}{130 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} = 61,01 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

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

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,192}{0,06} = 3,2; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,2}{0,06} = 3,33 \Rightarrow c_s = 1 \quad (9.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,18 \cdot (944 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{368,38 + 273,15}{826,50 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{368,38 + 273,15}{826,50 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 24,83 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,195} = 0,18 \quad (9.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (9,77 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,68 = 0,195 \quad (9.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (9.2.8)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,68}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{826,50 + 273,15}{1000} \right) = 9,771 / \text{ m} \cdot \text{ MPa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,192 \cdot 0,2}{0,06^2} - 1 \right) = 0,68 \text{ m} \quad (9.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 343,38 + 25 = 368,38^\circ \text{ C} \quad (9.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{ C}$ pro všechny výhřevné plochy

Střední teplota média

- výparník, stejná teplota vstupu i výstupu

$$t_{st}^m = 343,38^\circ\text{C} \quad (9.2.11)$$

9.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{494,62 - 471,62}{\ln\left(\frac{494,62}{471,62}\right)} = 483,03^\circ\text{C} \quad (9.2.12)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 838 - 343,38 = 494,62^\circ\text{C} \quad (9.2.13)$$

$$\Delta t_m = 815 - 343,38 = 471,62^\circ\text{C}$$

9.2.3 Výhřevná plocha

Plocha trubek mříže

$$S = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot z \cdot l_{tr} = \pi \cdot 0,06 \cdot 39 \cdot 2 \cdot 4,2 = 61,75\text{m}^2 \quad (9.2.14)$$

9.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{72,97 \cdot 61,75 \cdot 483,03}{4,86 \cdot 1000} = 448,24\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (9.2.15)$$

9.3 Celková bilance oblasti mříže 2

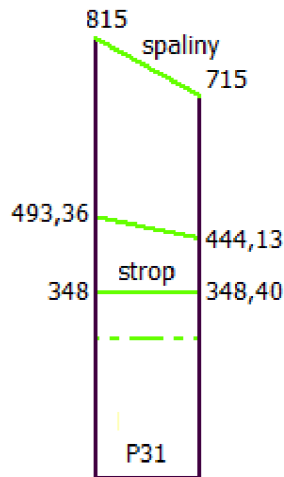
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{445,16 - 448,39}{445,16} \cdot 100 = -0,69\% \quad (9.3.1)$$

Odchylka se pohybuje v normě 5 %, proto lze považovat volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

10 Oblast přehříváku P31

Oblast se nachází za mříží 2 v přechodovém tahu. Spaliny předávají výkon dvěma paralelním plochám. Přehříváku P31, který je tvořen svazkem hadů trubek, a části stropního přehříváku.



Obr. 5 Oblast P31 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

výška	A	4,2 m
šířka	B	7,416 m
hloubka	C	1,625 m

10.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (14506,03 - 12560,37) = 1935,47 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (10.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{815 + 715}{2} = 765^\circ\text{C} \quad (10.1.2)$$

$$\lambda = 0,0778 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,000109 \text{ m}^2 / \text{s}$$

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

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{24,43} \cdot \left(1 + \frac{765}{273,15}\right) = 10,22 \text{ m} / \text{s} \quad (10.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - (n_{tr} \cdot D)) = 4,2 \cdot (7,416 - (50 \cdot 0,032)) = 24,43m^2 \quad (10.1.4)$$

10.2 Přeřívák P31

P31

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,022 m
příčná rozteč	s ₁	0,144 m
podélná rozteč	s ₂	0,15 m
počet trubek	n _{tr}	50
počet hadů	n _h	4
počet řad	z	16
délka trubky (hada)	l _{tr}	16,55 m

10.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{112,54} + \frac{1}{3524,08}} = 92,70W / m^2K \quad (10.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 86,29 + 26,25 = 112,54W / m^2K \quad (10.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (10.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,97 \cdot 0,36 \cdot \frac{0,0778}{0,032} \cdot \left(\frac{10,22 \cdot 0,032}{0,000109} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} = 86,29W / m^2K$$

Oprava

$$z \leq 10 \Rightarrow c_z = 4 \cdot 8^{0,02} - 3,2 = 0,97$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,72^{0,1} = 0,36$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,144}{0,032} = 4,5; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,032} = 2,03 \quad (10.2.4)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,5^2 + 2,03^2} = 3,03; \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{4,5 - 1}{3,03 - 1} = 1,72$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,18 \cdot (765 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{493,75 + 273,15}{765 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{493,75 + 273,15}{765 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 26,25 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,198} = 0,18 \quad (10.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (22,07 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,31 = 0,198 \quad (10.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (10.2.8)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,31}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{765 + 273,15}{1000} \right) = 22,071 \text{ / m} \cdot \text{MPa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,144 \cdot 0,065}{0,032^2} - 1 \right) = 0,31m \quad (10.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 468,75 + 25 = 493,75^\circ C \quad (10.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_i \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,077}{0,022} \cdot \left(\frac{16,35 \cdot 0,022}{27,84 \cdot 10^{-6} \cdot 0,021} \right)^{0,8} \cdot 1,07^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3524,08W / m^2 K$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{493,36 + 444,13}{2} = 468,75^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{13,93 + 13,78}{2} = 13,855 MPa$$

$$\lambda = 0,077W / mK \quad (10.2.12)$$

$$Pr = 1,07$$

$$\eta = 27,84 \cdot 10^{-6} Pas$$

$$\nu = 0,021m^3 / kg$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{58,33}{0,076} \cdot 0,021 = 16,35m / s \quad (10.2.13)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,022^2}{4} \cdot 50 \cdot 4 = 0,076m^2 \quad (10.2.14)$$

10.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{321,63 - 270,87}{\ln\left(\frac{321,63}{270,87}\right)} = 295,52^\circ\text{C} \quad (10.2.15)$$

Protiproudé uspořádání

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 815 - 493,36 = 321,64^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 715 - 444,14 = 270,87^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (10.2.16)$$

10.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot z = \pi \cdot 0,032 \cdot 16,55 \cdot 50 \cdot 4 = 332,76\text{m}^2 \quad (10.2.17)$$

10.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P32} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{92,70 \cdot 332,76 \cdot 295,52}{4,86 \cdot 1000} = 1877,46\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (10.2.18)$$

10.3 Strop nad P31 (část P1)

Strop P1

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	102
délka trubky	l_{tr}	1,625 m

10.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{40,93} + \frac{1}{10036,78}} = 34,65\text{W} / \text{m}^2\text{K} \quad (10.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 18,53 + 22,40 = 40,93 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (10.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

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

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0778}{0,22} \cdot \left(\frac{10,22 \cdot 0,22}{109 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,58^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 18,53 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 24,43}{522,03} = 0,22 \quad (10.3.4)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (7,416 + 4,2 + 50 \cdot (0,032 + 4,2)) = 522,03 \text{ m} \quad (10.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,18 \cdot (765 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{373,2 + 273,15}{765 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{373,2 + 273,15}{765 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 22,40 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

- stejný jako u P31, viz rovnice (10.2.6)

Optická hustota spalin

- stejná jako u P31, viz rovnice (10.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u P31, viz rovnice (10.2.8)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

- stejná jako u P31, viz rovnice (10.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 348,20 + 25 = 373,20^\circ C \quad (10.3.7)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

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

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,109}{0,024} \cdot \left(\frac{12,12 \cdot 0,024}{22,98 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0109} \right)^{0,8} \cdot 2,11^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 10036,78 W / m^2 K$$
(10.3.8)

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{348,40 + 348}{2} = 348,20^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{15,20 + 15,19}{2} = 15,205 MPa$$

$$\lambda = 0,109 W / mK$$

$$Pr = 2,11$$

$$\eta = 22,98 \cdot 10^{-6} Pas$$

$$\nu = 0,0109 m^3 / kg$$
(10.3.9)

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,046} \cdot 0,0109 = 12,12 m / s$$
(10.3.10)

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 102 = 0,046 m^2$$
(10.3.11)

10.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{467 - 366,60}{\ln \left(\frac{467}{366,60} \right)} = 414,78^\circ C$$
(10.3.12)

Souproudé uspořádání

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 815 - 348 = 467^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 715 - 348,40 = 366,6^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{10.3.13}$$

10.3.3 Výhřevná plocha

Plocha stropu

$$S = \pi \cdot D \cdot (l_{tr} + 0,2) \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot (1,625 + 0,2) \cdot 102 = 18,71\text{m}^2\tag{10.3.14}$$

10.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{strop} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{34,65 \cdot 18,71 \cdot 414,78}{4,86 \cdot 1000} = 55,39\text{kJ} / \text{m}^3\tag{10.3.15}$$

10.4 Celková bilance oblasti P31

$$\begin{aligned}Q_v &= Q_v^{P31} + Q_v^{strop} \\ Q_v &= 1877,46 + 55,39 = 1932,85\text{kJ} / \text{m}^3\end{aligned}\tag{10.4.1}$$

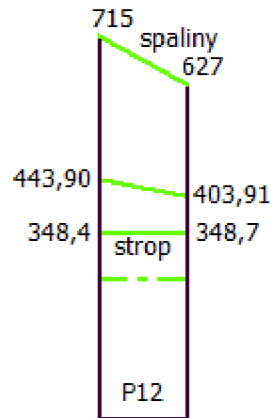
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1932,85 - 1935,47}{1935,47} \cdot 100 = 0,14\%\tag{10.4.2}$$

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

11 Oblast přehříváku P12

Oblast se nachází za přehřívákem P32 na konci přechodového tahu. Spaliny předávají výkon dvěma paralelním plochám. Přehříváku P12, který je tvořen svazkem hadů trubek, a poslední části stropního přehříváku.



Obr. 6 Oblast P12 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

výška	A	4,2 m
šířka	B	7,416 m
hloubka	C	1,46 m

11.1 Bilanční teplo spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (12560,37 - 10907,79) = 1643,92 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (11.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalín

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{715 + 627}{2} = 671^\circ\text{C} \quad (11.1.2)$$

$$\lambda = 0,07 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,0000914 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,59$$

Rychlost spalín

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15} \right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{23,18} \cdot \left(1 + \frac{671}{273,15} \right) = 9,77 \text{ m} / \text{s} \quad (11.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - (n_{tr} \cdot D)) = 4,2 \cdot (7,416 - (50 \cdot 0,038)) = 23,17 m^2 \quad (11.1.4)$$

11.2 Přeřívák P12

P12

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
příčná rozteč	s ₁	0,144 m
podélná rozteč	s ₂	0,065 m
počet trubek	n _{tr}	50
počet řad	z	8
počet hadů	n _h	2
délka trubky (hada)	l _{tr}	32,54 m

11.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{98,75} + \frac{1}{3490,54}} = 81,63 W / m^2 K \quad (11.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 79,16 + 19,59 = 98,75 W / m^2 K \quad (11.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,97 \cdot 0,37 \cdot \frac{0,07}{0,038} \cdot \left(\frac{9,78 \cdot 0,038}{0,0000914} \right)^{0,65} \cdot 0,59^{0,33} = 79,16 W / m^2 K$$

Oprava

$$z \leq 10 \Rightarrow c_z = 4 \cdot 8^{0,02} - 3,2 = 0,97$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,8^{0,1} = 0,36$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,144}{0,038} = 3,8; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,038} = 1,7 \quad (11.2.4)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,8^2 + 1,7^2} = 2,6; \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{3,8 - 1}{2,6 - 1} = 1,8$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot (671 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{448,91 + 273,15}{671 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{448,91 + 273,15}{671 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 19,59 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,189} = 0,17 \quad (11.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (26,31 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,31 = 0,189 \quad (11.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,25}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{671 + 273,15}{1000} \right) = 26,311 / \text{m} \cdot \text{MPa}$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,144 \cdot 0,065}{0,038^2} - 1 \right) = 0,25m \quad (11.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 423,91 + 25 = 448,91^\circ C \quad (11.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_i \cdot c_l \cdot c_m \quad (11.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,077}{0,03} \cdot \left(\frac{12,88 \cdot 0,03}{25,93 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018} \right)^{0,8} \cdot 1,19^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3490,54 W / m^2 K$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{443,90 + 403,91}{2} = 423,91^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{14,48 + 14,68}{2} = 14,58 MPa$$

$$\lambda = 0,077 W / mK \quad (11.2.12)$$

$$Pr = 1,19$$

$$\eta = 25,93 \cdot 10^{-6} Pa \cdot s$$

$$\nu = 0,0177 m^3 / kg$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,071} \cdot 0,018 = 12,88 m / s \quad (11.2.13)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 50 \cdot 2 = 0,071 m^2 \quad (11.2.14)$$

11.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{271,10 - 223,09}{\ln\left(\frac{271,10}{223,09}\right)} = 246,32^\circ\text{C} \quad (11.2.15)$$

Protiproudé uspořádání

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 715 - 443,90 = 271,10^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 627 - 403,91 = 223,09^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (11.2.16)$$

11.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 32,54 \cdot 50 \cdot 2 = 388,46\text{m}^2 \quad (11.2.17)$$

11.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P12} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{81,63 \cdot 388,46 \cdot 246,32}{4,86 \cdot 1000} = 1608,64\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (11.2.18)$$

11.3 Strop nad P12 (část P1)

Strop P1

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	102
délka trubky	l_{tr}	1,46 m

11.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{36,41} + \frac{1}{9927,18}} = 30,83\text{W} / \text{m}^2\text{K} \quad (11.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 18,83 + 17,57 = 36,41 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (11.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (11.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,07}{0,21} \cdot \left(\frac{9,78 \cdot 0,21}{91 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 18,83 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 23,17}{447,03} = 0,21 \quad (11.3.4)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (7,416 + 4,2 + 50 \cdot (0,038 + 4,2)) = 447,03 \text{ m} \quad (11.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (11.3.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot (671 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{373,55 + 273,15}{671 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{373,55 + 273,15}{671 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 17,57 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u P12, viz rovnice (11.2.6)
Optická hustota spalin
- stejná jako u P12, viz rovnice (11.2.7)
Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
- stejný jako u P12, viz rovnice (11.2.8)
Efektivní tloušťka sálavé vrstvy
- stejná jako u P12, viz rovnice (11.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 348,55 + 25 = 373,55^\circ C \quad (11.3.7)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (11.3.8)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,109}{0,024} \cdot \left(\frac{12,19 \cdot 0,024}{22,98 \cdot 10^{-6} \cdot 0,011} \right)^{0,8} \cdot 2,08^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 9927,18 W / m^2 K$$

Sřední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{348,40 + 348,70}{2} = 348,55^\circ C$$

$$p_{st}^m = \frac{15,20 + 15,19}{2} = 15,195 MPa$$

$$\lambda = 0,109 W / mK \quad (11.3.9)$$

$$Pr = 2,08$$

$$\eta = 22,98 \cdot 10^{-6} Pas$$

$$\nu = 0,011 m^3 / kg$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,046} \cdot 0,011 = 12,19 m / s \quad (11.3.10)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 102 = 0,046 m^2 \quad (11.3.11)$$

11.3.2 Sřední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{366,60 - 278,30}{\ln \left(\frac{366,60}{278,30} \right)} = 320,42^\circ C \quad (11.3.12)$$

Souproudé uspořádání

$$\begin{aligned}\Delta t_v &= 715 - 348,40 = 366,60^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 627 - 348,70 = 278,30^\circ\text{C}\end{aligned}\tag{11.3.13}$$

11.3.3 Výhřevná plocha

Plocha stropu

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot 1,46 \cdot 102 = 14,97\text{m}^2\tag{11.3.14}$$

11.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{strop} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{30,83 \cdot 14,97 \cdot 320,42}{4,86 \cdot 1000} = 30,46\text{kJ} / \text{m}^3\tag{11.3.15}$$

11.4 Celková bilance oblasti P12

$$\begin{aligned}Q_v &= Q_v^{P12} + Q_v^{strop} \\ Q_v &= 1608,64 + 30,46 = 1639,10\text{kJ} / \text{m}^3\end{aligned}\tag{11.4.1}$$

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1643,92 - 1639,10}{1643,92} \cdot 100 = 0,29\%\tag{11.4.2}$$

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

12 Oblast mříže 3

Oblast je tvořena mříží, a to jednou řadou trubek, která je součástí přehříváku P1, a částí stropu před mříží 3, který převádí páru z mříže a přechodového tahu do přehříváku P12. Díl stropu je započítán jako přídavná plocha v rovnici (12.2.17).

Rozměry počítané oblasti z výkresu

výška	A	4,2 m
šířka	B	7,416 m
hloubka	C	0,816 m

12.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (10907,79 - 10857,46) = 50,06 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (12.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{627 + 624,30}{2} = 625,65^\circ\text{C} \quad (12.1.2)$$

$$\lambda = 0,065 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,00009 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,59$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{23,17} \cdot \left(1 + \frac{625,65}{273,15}\right) = 9,28 \text{ m} / \text{s} \quad (12.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - n_{tr} \cdot D) = 4,2 \cdot (7,416 - 50 \cdot 0,038) = 23,17 \text{ m}^2 \quad (12.1.4)$$

12.2 Mříž 3

Část P1

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
počet trubek	n_{tr}	50
počet řad	z	1
délka trubky	l_{tr}	4,2 m
příčná rozteč	s_1	0,144 m
podélná rozteč	s_2	0 m

12.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{41,84} + \frac{1}{3747,19}} = 35,17 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (12.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 3,49 + 38,35 = 41,84 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (12.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (12.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,90 \cdot 0,063 \cdot \frac{0,065}{0,038} \cdot \left(\frac{9,28 \cdot 0,038}{0,00009} \right)^{0,65} \cdot 0,59^{0,33} = 3,49 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

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

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,144}{0,038} = 3,8; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0}{0,038} = 0 \Rightarrow c_s = 0,063 \quad (12.2.4)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,38 \cdot (625,65 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{428,32 + 273,15}{625,65 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{428,32 + 273,15}{625,65 + 273,15}} \quad (12.2.5)$$

$$\alpha_s = 38,35 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,483} = 0,38 \quad (12.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (4,18 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 3,93 = 0,483 \quad (12.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 3,93}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{625,65 + 273,15}{1000} \right) = 4,181 / \text{ m} \cdot \text{ MPa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{4,2 \cdot 7,416 \cdot 0,813}{23,17} = 3,93 \text{ m} \quad (12.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 403,32 + 25 = 428,32^\circ \text{ C} \quad (12.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{ C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

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

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,079}{0,03} \cdot \left(\frac{11,88 \cdot 0,03}{25,03 \cdot 10^{-6} \cdot 0,016} \right)^{0,8} \cdot 1,27^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3747,19 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{403,91 + 402,73}{2} = 403,32^\circ \text{C}$$

$$p_{st}^m = \frac{14,68 + 14,69}{2} = 14,685 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,079 \text{ W} / \text{mK} \quad (12.2.12)$$

$$\text{Pr} = 1,27$$

$$\eta = 25,03 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$$

$$\nu = 0,016 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,035} \cdot 0,016 = 11,88 \text{ m} / \text{s} \quad (12.2.13)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 50 \cdot 1 = 0,035 \text{ m}^2 \quad (12.2.14)$$

12.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{223,09 - 221,57}{\ln \left(\frac{223,09}{221,57} \right)} = 222,33^\circ \text{C} \quad (12.2.15)$$

Protiproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 627 - 403,91 = 223,33^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 624,30 - 402,73 = 221,57^\circ \text{C} \quad (12.2.16)$$

12.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech trubek (mříž 3 a část stropu)

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} + 0,775 \cdot B = \pi \cdot 0,038 \cdot 4,2 \cdot 50 + 0,775 \cdot 7,416 = 30,82 m^2 \quad (12.2.17)$$

12.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{mříž3} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{81,63 \cdot 35,17 \cdot 222,33}{4,86 \cdot 1000} = 49,64 kJ / m^3 \quad (12.2.18)$$

12.3 Celková bilance oblasti mříže 3

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{50,06 - 49,64}{50,06} \cdot 100 = 0,86\% \quad (12.3.1)$$

Odchylka se pohybuje v normě 5 %, proto lze považovat volenou odchozí teplotu spalin za správnou.

13 Vratná komora

Vratná komora je prostor mezi přechodovým a druhým tahem kotle. V tomto prostoru se nachází část závěsných trubek přehříváku P11, část EKA2 (na bočních stěnách) a trubky membránové stěny a stropu převádějícího páru z P11 do P12 (čelní a zadní stěny). V oblasti vratné komory se uvažuje pouze sálání, konvekce nikoli.

Rozměry počítané oblasti z výkresu

hloubka	A	4 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	4,535 m

13.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (10857,46 - 10728,84) = 127,94 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (13.1.1)$$

Střední teplota proudu spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{624,30 + 617,4}{2} = 620,85^\circ \text{C} \quad (13.1.2)$$

13.2 Závěsné trubky (část P1)

ZTR P1

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	100
délka trubky	l_{tr}	3,6 m
příčná rozteč	s_1	0,144 m
podélná rozteč	s_2	0,58 m

13.2.1 Množství tepla odevzdané závěsným trubkám

$$Q_v^{ZTR} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{úš}}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{50,73 \cdot (620,85 - 373,55) \cdot 11,58}{4,86 \cdot 1000} = 30,11 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (13.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,56 \cdot (620,85 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{373,55 + 273,15}{620,85 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{373,55 + 273,15}{620,85 + 273,15}} \quad (13.2.2)$$

$$\alpha_s = 51,04 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,822} = 0,56 \quad (13.2.3)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (5,31 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 5,33 = 0,822 \quad (13.2.4)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 5,33}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{617,65 + 273,15}{1000} \right) = 5,311 / \text{ m} \cdot \text{ MPa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{\left((4 \cdot 4,535 \cdot 7,416) - \left(\frac{3,14 \cdot 2}{2} \cdot 7,416 \right) \right)}{75,07} = 5,33 \text{ m} \quad (13.2.6)$$

Celkový povrch stěn sálající vrstvy

$$F_{st} = F_{st}^{ztr} + F_{st}^{P1} + F_{st}^{EKO} = 36,19 + 23,80 + 15,08 = 75,07 m^2$$

$$F_{st}^{ztr} = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4,4 + 4,1 + 3,1 + 2,8}{4} \right) \cdot 100 = 36,19 m^2$$

$$F_{st}^{P1} = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,038}{2} \cdot (2,535 + 3,723 + 1,715) \cdot 50 = 23,80 m^2$$

$$F_{st}^{EKO} = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,06}{2} \cdot 4 \cdot 40 = 15,08 m^2$$
(13.2.7)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 384,55 + 25 = 373,55^\circ C$$
(13.2.8)

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Účinná sálavá plocha

$$F_{ús} = F_{st}^{ztr} \cdot x = 36,19 \cdot 0,32 = 11,58 m^2$$
(13.2.9)

13.3 Zadní stěna a strop (část P1)

Stěna P1

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
počet trubek	n_{tr}	50
délka trubky	l_{tr}	7,937 m
příčná rozteč	s_1	0,144 m

13.3.1 Množství tepla odevzdané zadní stěně

$$Q_v^{P1} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{ús}}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{55,15 \cdot (620,85 - 428,32) \cdot 23,80}{4,86 \cdot 1000} = 52,34 kJ / m^3$$
(13.3.1)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,56 \cdot (620,85 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{428,32 + 273,15}{620,85 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{428,32 + 273,15}{620,85 + 273,15}} \quad (13.3.2)$$

$$\alpha_s = 55,47 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

- stejný jako u ZTR, viz rovnice (13.2.3)

Optická hustota spalin

- stejná jako u ZTR, viz rovnice (13.2.4)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u ZTR, viz rovnice (13.2.5)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

- stejná jako u ZTR, viz rovnice (13.2.6)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 403,32 + 25 = 428,32^\circ \text{C} \quad (13.3.3)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Účinná sálavá plocha

$$F_{\dot{u}s} = F_{st}^{P1} \cdot x = 23,80 \cdot 1 = 23,80 \text{ m}^2 \quad (13.3.4)$$

13.4 Stěny EKO2

Část EKA2

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m
počet trubek	n_{tr}	40
délka trubky	l_{tr}	4 m
příčná rozteč	s_1	0,2 m

13.4.1 Množství tepla odevzdané do EKA2

$$Q_v^{P1} = \frac{\alpha_s \cdot (t_{st} - t_z) \cdot F_{ús}}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{44,02 \cdot (620,85 - 281) \cdot 15,08}{4,86 \cdot 1000} = 46,77 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (13.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (13.4.2)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,56 \cdot (620,85 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{281 + 273,15}{620,85 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{281 + 273,15}{620,85 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 44,31 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u ZTR, viz rovnice (13.2.3)
Optická hustota spalin
- stejná jako u ZTR, viz rovnice (13.2.4)
Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
- stejný jako u ZTR, viz rovnice (13.2.5)
Efektivní tloušťka sálavé vrstvy
- stejná jako u ZTR, viz rovnice (13.2.6)
Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 256 + 25 = 281^\circ\text{C} \quad (13.4.3)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Účinná sálavá plocha

$$F_{ús} = F_{st}^{EKO} \cdot x = 15,08 \cdot 1 = 15,08\text{m}^2 \quad (13.4.4)$$

13.5 Množství tepla odevzdané ze spalin do oblasti vratné komory

$$Q_v = Q_v^{ztr} + Q_v^{P1} + Q_v^{EKO} = 30,11 + 52,34 + 46,77 = 129,22\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (13.5.1)$$

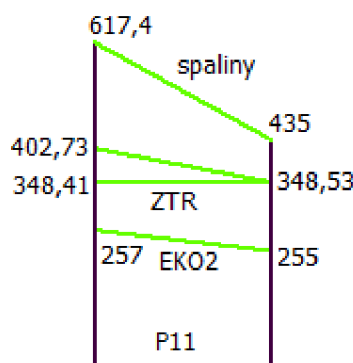
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{127,94 - 129,22}{127,94} \cdot 100 = -1,00\% \quad (13.5.2)$$

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

14 Oblast přehříváku P11

Oblast se nachází za vratnou komorou ve druhém tahu kotle. Spaliny předávají výkon třem paralelním plochám. Přehříváku P11, který je tvořen svazkem hadů trubek, části závěsných trubek tohoto přehříváku a části EKA2 na bočních stěnách tahu.



Obr. 7 Oblast P11 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

hloubka	A	4 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	5,965 m

14.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (10728,84 - 7382,20) = 3229,11 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (14.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{617,40 + 435}{2} = 526,20^\circ \text{C} \quad (14.1.2)$$

$$\lambda = 0,0622 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,0000746 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,6$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{22,06} \cdot \left(1 + \frac{526,20}{273,15}\right) = 8,62 \text{ m} / \text{s} \quad (14.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - (n_{tr} \cdot D)) = 4 \cdot (7,416 - (50 \cdot 0,038)) = 22,06 \text{ m}^2 \quad (14.1.4)$$

14.2 Přeřívák P11

P11

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,03 m
příčná rozteč	s ₁	0,144 m
podélná rozteč	s ₂	0,065 m
počet trubek	n _{tr}	50
počet řad	z	30
počet hadů	n _h	2
délka trubky (hada)	l _{tr}	122,98 m

14.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{90,62} + \frac{1}{4416,80}} = 75,48 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (14.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 76,43 + 14,19 = 90,62 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (14.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (14.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,36 \cdot \frac{0,0622}{0,038} \cdot \left(\frac{8,62 \cdot 0,038}{0,0000746} \right)^{0,65} \cdot 0,6^{0,33} = 76,43 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

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

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,8^{0,1} = 0,36$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,144}{0,038} = 3,8; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,038} = 1,7 \quad (14.2.4)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,8^2 + 1,7^2} = 2,6; \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} = \frac{3,8 - 1}{2,6 - 1} = 1,8$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot (526,20 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{400,63 + 273,15}{526,20 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{400,63 + 273,15}{526,20 + 273,15}} \quad (14.2.5)$$

$$\alpha_s = 14,19 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,205} = 0,19 \quad (14.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (28,18 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,25 = 0,205 \quad (14.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,25}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{522 + 273,15}{1000} \right) = 28,181 / \text{m} \cdot \text{MPa} \quad (14.2.8)$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,144 \cdot 0,065}{0,038^2} - 1 \right) = 0,25 \text{ m} \quad (14.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 375,63 + 25 = 400,63^\circ \text{C} \quad (14.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

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

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,084}{0,03} \cdot \left(\frac{10,26 \cdot 0,03}{23,86 \cdot 10^{-6} \cdot 0,014} \right)^{0,8} \cdot 1,48^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 4416,80 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{402,73 + 348,53}{2} = 375,63^\circ \text{C}$$

$$p_{st}^m = \frac{15,08 + 14,69}{2} = 14,86 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,084 \text{ W / mK} \quad (14.2.12)$$

$$\text{Pr} = 1,48$$

$$\eta = 23,86 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$$

$$\nu = 0,0141 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,071} \cdot 0,014 = 10,26 \text{ m / s} \quad (14.2.13)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 50 \cdot 2 = 0,071 \text{ m}^2 \quad (14.2.14)$$

14.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{214,67 - 86,47}{\ln \left(\frac{214,67}{86,47} \right)} = 140,99^\circ \text{C} \quad (14.2.15)$$

Protiproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 617,40 - 402,73 = 214,67^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 435 - 348,53 = 86,47^\circ \text{C} \quad (14.2.16)$$

14.2.3 Výhřevná plocha

Plocha všech trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 122,98 \cdot 50 \cdot 2 = 1468,14 m^2 \quad (14.2.17)$$

14.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{P11} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{75,48 \cdot 1468,14 \cdot 140,99}{4,86 \cdot 1000} = 3118,74 kJ / m^3 \quad (14.2.18)$$

14.3 Závěsné trubky (část P1)

ZTR

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
počet trubek	n_{tr}	100
délka trubky	l_{tr}	5,965 m

14.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{31,50} + \frac{1}{9931,09}} = 26,68 W / m^2 K \quad (14.3.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 17,94 + 13,55 = 31,50 W / m^2 K \quad (14.3.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (14.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,07}{0,21} \cdot \left(\frac{8,62 \cdot 0,21}{75 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 17,94 W / m^2 K$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 22,06}{426,63} = 0,21 \quad (14.3.4)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (7,416 + 4 + 50 \cdot (0,038 + 4)) = 426,63m \quad (14.3.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (14.3.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot (526,20 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{373,47 + 273,15}{526,20 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{373,47 + 273,15}{526,20 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 13,55W / m^2K$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

- stejný jako u P11, viz rovnice (14.2.6)

Optická hustota spalin

- stejná jako u P11, viz rovnice (14.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- stejný jako u P11, viz rovnice (14.2.8)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

- stejná jako u P11, viz rovnice (14.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 348,47 + 25 = 373,47^\circ C \quad (14.3.7)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ C$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (14.3.8)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,107}{0,024} \cdot \left(\frac{12,19 \cdot 0,024}{22,94 \cdot 10^{-6} \cdot 0,011} \right)^{0,8} \cdot 2,05^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 9931,09 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média

$$t_{st}^m = \frac{348,41 + 348,53}{2} = 348,47^\circ \text{C}$$

$$p_{st}^m = \frac{15,08 + 15,14}{2} = 15,11 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,107 \text{ W} / \text{mK} \quad (14.3.9)$$

$$\text{Pr} = 2,05$$

$$\eta = 22,94 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$$

$$\nu = 0,011 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot \nu = \frac{0,88 \cdot 58,33}{0,045} \cdot 0,011 = 12,59 \text{ m} / \text{s} \quad (14.3.10)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_r = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 100 = 0,045 \text{ m}^2 \quad (14.3.11)$$

14.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{268,87 - 86,59}{\ln \left(\frac{268,87}{86,59} \right)} = 160,88^\circ \text{C} \quad (14.3.12)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 435 - 348,41 = 268,87^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 395,75 - 348,53 = 86,59^\circ \text{C} \quad (14.3.13)$$

14.3.3 Výhřevná plocha

Plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot 5,965 \cdot 100 = 59,97 m^2 \quad (14.3.14)$$

14.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{ZTR} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{26,69 \cdot 59,97 \cdot 160,88}{4,86 \cdot 1000} = 53,03 kJ / m^3 \quad (14.3.15)$$

14.4 Stěny (část EKA2)

EKO2

vnější průměr trubky	D	0,06 m
tloušťka stěny	tl.	0,005 m
vnitřní průměr trubky	d	0,05 m
počet trubek	n_{tr}	40
délka trubky	l_{tr}	4 m
příčná rozteč	s_1	0,2 m

14.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 29,50 = 25,08 W / m^2 K \quad (14.4.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 17,94 + 11,56 = 29,50 W / m^2 K \quad (14.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

- stejný jako u předchozí plochy ZTR, viz rovnice (14.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,19 \cdot (526,20 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{279,70 + 273,15}{526,20 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{279,70 + 273,15}{526,20 + 273,15}} \quad (14.4.3)$$

$$\alpha_s = 11,56 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

- stupeň černosti povrchu stěn $a_{st}=0,8$
Stupeň černosti proudu spalin
- stejný jako u P11, viz rovnice (14.2.6)
Optická hustota spalin
- stejná jako u P11, viz rovnice (14.2.7)
Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
- stejný jako u P11, viz rovnice (14.2.8)
Efektivní tloušťka sálavé vrstvy
- stejná jako u P11, viz rovnice (14.2.9)
Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 254,70 + 25 = 279,70^\circ \text{C} \quad (14.4.4)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

14.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{362,40 - 180,60}{\ln\left(\frac{362,40}{180,60}\right)} = 261,03^\circ \text{C} \quad (14.4.5)$$

Souproudé uspořádání

$$\Delta t_v = 617,4 - 255 = 362,40^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_m = 435 - 254,40 = 180,60^\circ \text{C} \quad (14.4.6)$$

14.4.3 Výhřevná plocha

Plocha trubek EKA2

$$S = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,06}{2} \cdot 4 \cdot 40 = 22,49m^2 \quad (14.4.7)$$

14.4.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v^{EKO2} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{25,08 \cdot 22,49 \cdot 261,03}{4,86 \cdot 1000} = 30,32kJ / m^3 \quad (14.4.8)$$

14.5 Celková bilance oblasti P11

$$Q_v = Q_v^{P11} + Q_v^{ZTR} + Q_v^{EKO2} \quad (14.5.1)$$

$$Q_v = 3217,85 + 53,03 + 30,32 = 3301,19kJ / m^3$$

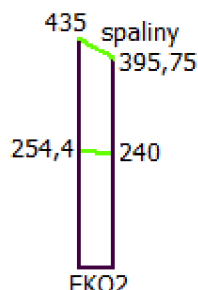
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3264,57 - 3301,19}{3329,11} \cdot 100 = 0,84\% \quad (14.5.2)$$

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

15 Oblast EKA2

Oblast se nachází za přehřívákem P11 v nechlazeném kanále druhého tahu kotle. Spaliny v této oblasti předávají výkon pouze do EKA2, který je tvořen svazkem trubek.



Obr. 8 Oblast EKA2 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti z výkresu

hloubka	A	4 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	1,94 m

15.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (7382,20 - 6715,98) = 622,73 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (15.1.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{435 + 395,75}{2} = 415,38^\circ\text{C} \quad (15.1.2)$$

$$\lambda = 0,05 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,0000525 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,62$$

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{22,06} \cdot \left(1 + \frac{415,38}{273,15}\right) = 7,97 \text{ m} / \text{s} \quad (15.1.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - (n_{tr} \cdot D)) = 4 \cdot (7,416 - (39 \cdot 0,032)) = 20,41 \text{ m}^2 \quad (15.1.4)$$

15.2 EKO2

EKO2

vnější průměr trubky	D	0,032 m
tloušťka stěny	tl.	0,004 m
vnitřní průměr trubky	d	0,024 m
příčná rozteč	s ₁	0,1 m
podélná rozteč	s ₂	0,05 m
počet trubek	n _{tr}	39
počet řad	z	6
počet hadů	n _h	4
délka trubky (hada)	l _{tr}	17,9 m

15.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 81,08 = 68,91 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (15.2.1)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 73,94 + 7,13 = 81,08 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (15.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (15.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,95 \cdot 0,36 \frac{0,05}{0,032} \cdot \left(\frac{7,97 \cdot 0,032}{52,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,62^{0,33} = 73,94 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

$$z \leq 10 \Rightarrow c_z = 4 \cdot 6^{0,02} - 3,2 = 0,95$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,76^{0,1} = 0,36$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,032} = 3,1; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,05}{0,032} = 1,6 \quad (15.2.4)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,1^2 + 1,6^2} = 2,21; \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{3,1 - 1}{2,21 - 1} = 1,76$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,16 \cdot (415,38 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{272,20 + 273,15}{415,38 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{272,20 + 273,15}{415,38 + 273,15}} \quad (15.2.5)$$

$$\alpha_s = 7,13 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,170} = 0,16 \quad (15.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (38,50 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,15 = 0,170 \quad (15.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,15}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{413,50 + 273,15}{1000} \right) = 38,501 / \text{m} \cdot \text{MPa} \quad (15.2.8)$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,05}{0,032^2} - 1 \right) = 0,15 \text{ m} \quad (15.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 247,20 + 25 = 272,20^\circ \text{C} \quad (15.2.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t=25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Střední teplota média

$$t_{st}^m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{240 + 254,40}{2} = 247,20^\circ\text{C} \quad (15.2.11)$$

15.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{180,60 - 155,75}{\ln\left(\frac{180,60}{155,75}\right)} = 167,87^\circ\text{C} \quad (15.2.12)$$

Protiproudé uspořádání

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 435 - 254,40 = 180,60^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 395,75 - 240 = 155,75^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (15.2.13)$$

15.2.3 Výhřevná plocha

Plocha trubek svazku EKA2

$$S = \pi \cdot D \cdot n_r \cdot n_h \cdot l_r = \pi \cdot 0,032 \cdot 39 \cdot 4 \cdot 17,9 = 280,72\text{m}^2 \quad (15.2.14)$$

15.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_v = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{68,91 \cdot 280,72 \cdot 167,87}{4,86 \cdot 1000} = 668,86\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (15.2.15)$$

15.3 Celková bilance oblasti EKA2

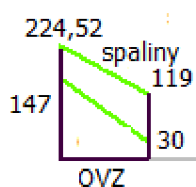
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{662,73 - 668,86}{662,73} \cdot 100 = -0,92\% \quad (15.3.1)$$

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

16 Oblast OVZ

Původní regenerativní OVZ je nahrazen trubkovým OVZ. Teplosměnná plocha je dimenzována na volenou teplotu výstupních spalin (119 °C) a vstupní (30 °C) a výstupní (147 °C) teploty vzduchu.



Obr. 9 Oblast OVZ (uvedené hodnoty jsou v °C)

16.1 Rovnice tepelné bilance na straně média

$$Q_b = \left(\beta_{OVZ}'' + \frac{\Delta\alpha_{OVZ}}{2} + \beta_{rec} \right) \cdot (I_{VZ, \min}'' - I_{VZ, \min}') \quad (16.1.1)$$

$$Q_b = (1,05 + 0 + 0) \cdot (1927,02 - 390,80) = 1613,07 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

- neuvažuje se přísávání falešného vzduchu

16.2 Bilanční teplo spalin – vstupní entalpie spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) \Rightarrow I_1 = \frac{Q_b}{\varphi} + I_2 = \frac{1613,07}{0,995} + 1781,24 = 3402,81 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (16.2.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{224,52 + 119}{2} = 171,76^\circ\text{C} \quad (16.2.2)$$

$$\lambda = 0,029 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,000018 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,72$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15} \right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{8,21} \cdot \left(1 + \frac{171,76}{273,15} \right) = 12,41 \text{ m} / \text{s} \quad (16.2.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,035^2}{4} \cdot 97 \cdot 88 = 8,21 m^2 \quad (16.2.4)$$

16.3 OVZ

OVZ

vnější průměr trubky	D	0,038 m
tloušťka stěny	tl.	0,0015 m
vnitřní průměr trubky	d	0,035 m
příčná rozteč	s ₁	0,073 m
podélná rozteč	s ₂	0,042 m
počet trubek	n _{tr}	97
počet řad	z	88
délka trubky	l _{tr}	2,15 m
počet vrstev	x	2

16.4 Rovnice sdílení tepla – potřebná plocha

$$S = \frac{Q_b \cdot M_{pv} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t} = \frac{1613,07 \cdot 4,86 \cdot 1000}{28,11 \cdot 68,99} = 4038,34 m^2 \quad (16.4.1)$$

16.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{55,11 \cdot 82,69}{55,11 + 82,69} = 28,11 W / m^2 K \quad (16.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 53,57 + 1,54 = 55,11 W / m^2 K \quad (16.4.3)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (16.4.4)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,029}{0,35} \cdot \left(\frac{12,41 \cdot 0,35}{18 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,72^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 53,57 W / m^2 K$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,11 \cdot (171,76 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{113,50 + 273,15}{171,76 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{113,50 + 273,15}{171,76 + 273,15}} \quad (16.4.5)$$

$$\alpha_s = 1,54 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,119} = 0,11 \quad (16.4.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (69,71 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,06 = 0,119 \quad (16.4.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad (16.4.8)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,06}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{171,76 + 273,15}{1000} \right) = 69,711 / \text{m} \cdot \text{MPa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,073 \cdot 0,042}{0,038^2} - 1 \right) = 0,06 \text{ m} \quad (16.4.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 88,5 + 25 = 113,5^\circ \text{C} \quad (16.4.10)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ \text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (16.4.11)$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0,39 \cdot \frac{0,028}{0,038} \cdot \left(\frac{8,19 \cdot 0,038}{0,00002} \right)^{0,6} \cdot 0,69^{0,33} = 82,69 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Oprava

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

$$c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 1,98^{0,5} = 0,39$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,073}{0,038} = 1,9; \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,042}{0,038} = 1,1 \quad (16.4.12)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,9^2 + 1,1^2} = 1,5; \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,9 - 1}{1,5 - 1} = 1,98$$

Střední teplota, tlak a látkové vlastnosti proudu média [2]

$$t_{st}^m = \frac{147 + 30}{2} = 88,5^\circ \text{C}$$

$$\lambda = 0,028 \text{ W / mK} \quad (16.4.13)$$

$$Pr = 0,69$$

$$\nu = 0,00002 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Rychlost proudu média

$$w = 0,66 \cdot w_{sp} = 0,66 \cdot 12,41 = 8,19 \text{ m / s} \quad (16.4.14)$$

Výška vrstvy

$$x = \frac{f}{B - (n_r \cdot D)} = \frac{8,03}{7,416 - (97 \cdot 0,038)} = 2,15 \text{ m} \quad (16.4.15)$$

Průřez pro vzduch

$$f = \frac{M_{pv} \cdot \beta_{vz} \cdot O_{VZ \min}}{w} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}^m}{237,15} \right) = \frac{4,86 \cdot 1,05 \cdot 9,40}{8,19} \cdot \left(1 + \frac{88,5}{237,15} \right) = 8,03 \text{ m}^2 \quad (16.4.16)$$

Rozměry počítané oblasti

hloubka	A	4 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	4,5 m

16.4.2 Teplotní spád

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0,83 \cdot 83,13 = 68,99^\circ\text{C} \quad (16.4.17)$$

Křížové proudění

$$P = \frac{\tau_m}{t'' - t'} = \frac{147 - 30}{224,52 - 30} = 0,6 \quad (16.4.18)$$

$$R = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{224,52 - 119}{147 - 30} = 1,45 \quad (16.4.19)$$

- pro hodnoty P , R a počet smyček 2 vyplývá z nomogramu součinitel $\psi=0,83$

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{89 - 77,52}{\ln\left(\frac{89}{77,52}\right)} = 83,13^\circ\text{C} \quad (16.4.20)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 119 - 30 = 89^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 224,52 - 147 = 77,52^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (16.4.21)$$

16.4.3 Skutečná výhřevná plocha

Plocha všech trubek

$$S = \pi \cdot d \cdot l_{tr} \cdot x \cdot n_{tr} \cdot z = \pi \cdot 0,035 \cdot 2,15 \cdot 2 \cdot 97 \cdot 88 = 4043,43\text{m}^2 \quad (16.4.22)$$

16.4.4 Rovnice sdílení tepla – skutečné teplo

$$Q_v = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{28,11 \cdot 4043,43 \cdot 68,99}{4,86 \cdot 1000} = 1615,10\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (16.4.23)$$

16.5 Celková bilance OVZ

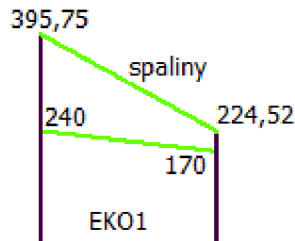
Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1613,07 - 1615,10}{1613,07} \cdot 100 = -0,13\% \quad (16.5.1)$$

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

17 Přídavné EKO1 (navrhované)

Přídavné EKO1 je nutné z důvodů lepšího vychlazení spalin a zvýšení účinnosti kotle. Při návrhu bylo vycházeno z původního EKA (EKO2). Byly převzaty rozměry trubek i jejich rozteče.



Obr. 10 Oblast EKA1 (uvedené hodnoty jsou v °C)

Rozměry počítané oblasti

hloubka	A	4 m
šířka	B	7,416 m
výška	C	4 m

17.1 Tepelná bilance na straně média

Hodnotu již známe z rovnice (5.2.2) $Q_b = 3295,32 \text{ kJ/m}^3$.

17.2 Bilanční teplo spalin

Navrhované EKO1 bude umístěno mezi oblast EKO2 a oblast OVZ, entalpie a teploty spalin jsou nám tedy známy.

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,995 \cdot (6715,98 - 3402,81) = 3295,82 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (17.2.1)$$

Střední teplota proudu a látkové vlastnosti spalin

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{395,75 + 224,52}{2} = 310,13^\circ\text{C} \quad (17.2.2)$$

$$\lambda = 0,049 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu = 0,0000445 \text{ m}^2 / \text{s}$$

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

Rychlost spalin

$$w = \frac{M_{pv} \cdot O_{spr}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{st}}{237,15}\right) = \frac{4,86 \cdot 12,2}{20,41} \cdot \left(1 + \frac{310,13}{273,15}\right) = 6,68 \text{ m} / \text{s} \quad (17.2.3)$$

Světlý průřez kanálu

$$F_{sp} = A \cdot (B - (n_{tr} \cdot D)) = 4 \cdot (7,416 - (39 \cdot 0,032)) = 20,41 m^2 \quad (17.2.4)$$

17.3 Oblast navrhovaného EKA1

Navrhované EKO1

vnější průměr trubky	D	0,032	m
tloušťka stěny	tl.	0,004	m
vnitřní průměr trubky	d	0,024	m
příčná rozteč	s ₁	0,1	m
podélná rozteč	s ₂	0,05	m
počet trubek	n _{tr}	39	
počet řad	z	21	
počet hadů	n _h	4	
délka trubky (hada)	l _{tr}	150,486	m

17.4 Rovnice sdílení tepla – potřebná plocha

$$S = \frac{Q_b \cdot M_{pv} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t} = \frac{3295,82 \cdot 4,86 \cdot 1000}{69,63 \cdot 96,44} = 2456,07 m^2 \quad (17.4.1)$$

17.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 81,84 = 69,63 W / m^2 K \quad (17.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 76,92 + 5 = 81,92 W / m^2 K \quad (17.4.3)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (17.4.4)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,36 \frac{0,049}{0,032} \cdot \left(\frac{6,68 \cdot 0,032}{44,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,64^{0,33} = 76,92 W / m^2 K$$

Oprava

- c_s je stejný jako u EKA2

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

$$c_s = 0,36 \quad (17.4.5)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro spalování plynu

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,16 \cdot (310,13 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{230 + 273,15}{310,13 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{230 + 273,15}{310,13 + 273,15}} \quad (17.4.6)$$

$$\alpha_s = 5W / m^2 K$$

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

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,178} = 0,16 \quad (17.4.7)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (40,27 \cdot 0,29 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,15 = 0,178 \quad (17.4.8)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

- hodnoty r_{sp} , r_{H_2O} , r_{RO_2} , p_{sp} jsou brány ze stechiometrie z rovnic (2.2.6), (2.2.4), (2.2.3) a (4.2.17)

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

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,202}{3,16 \cdot \sqrt{0,0294 \cdot 0,15}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{309,26 + 273,15}{1000} \right) \quad (17.4.9)$$

$$k_{sp} = 40,271 / m \cdot MPa$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,05}{0,032^2} - 1 \right) = 0,15m \quad (17.4.10)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{st}^m + \Delta t = 205 + 25 = 230^\circ\text{C} \quad (17.4.11)$$

- pro spalování plynu $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ pro všechny výhřevné plochy

Střední teplota média

$$t_{st}^m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{170 + 240}{2} = 205^\circ\text{C} \quad (17.4.12)$$

17.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{155,75 - 54,52}{\ln\left(\frac{155,75}{54,52}\right)} = 96,44^\circ\text{C} \quad (17.4.13)$$

Protiproudé uspořádání

$$\begin{aligned} \Delta t_v &= 395,75 - 240 = 155,75^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= 224,52 - 170 = 54,52^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (17.4.14)$$

17.4.3 Výhřevná plocha

Plocha trubek svazku navrhovaného EKA1

$$S = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_h \cdot l_{tr} = \pi \cdot 0,032 \cdot 39 \cdot 4 \cdot 150,486 = 2360,05\text{m}^2 \quad (17.4.15)$$

17.4.4 Rovnice sdílení tepla – skutečné teplo

$$Q_v = \frac{k \cdot S \cdot \Delta t}{M_{pv} \cdot 1000} = \frac{69,63 \cdot 2360,05 \cdot 96,44}{4,86 \cdot 1000} = 3263,88\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (17.4.16)$$

17.5 Celková bilance oblasti navrhovaného EKA1

Kontrola odchylky

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3295,82 - 3263,88}{3295,82} \cdot 100 = 0,97\% \quad (17.5.1)$$

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

18 Celková bilance kotle

Celková bilance se provádí na straně spalín. Odchylka od celkového přivedeného tepla musí být do 0,5%.

$$\Delta Q_{celk} = Q_p^p \cdot \eta_k - \sum Q_i = 34300 \cdot 0,995 - 32694,30 = -127,77 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (17.5.1)$$

Teplu odevzdané v jednotlivých plochách na straně spalín

$$\sum Q_i = \varphi \cdot (I_u - I_{EKOnav}) = 0,995 \cdot (36269,30 - 3402,81) = 32694,30 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (17.5.2)$$

Odchylka

$$\Delta = \frac{\Delta Q_{celk}}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{-127,77}{34300} \cdot 100 = -0,37\% \quad (17.5.3)$$

Při tepelném výpočtu výhřevných ploch byly dodrženy povolené odchylky tepla předaného prostupem tepla od bilančního tepla. Odchylka se pohybuje v normě do 0,5 %.

19 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout stávající kotel na spalování černého uhlí pro čistě plynový provoz, navrhnout úpravy spalovací komory a výhřevných ploch a provést jejich tepelný výpočet, stávající regenerativní ohřívač vzduchu Ljungström nahradit trubkovým ohřívačem vzduchu a navrhnout opatření pro dodržení emisního limitu $\text{NO}_x=100 \text{ mg/Nm}^3$.

Prvním krokem výpočtu kotle jsou stechiometrické výpočty, jejichž výsledkem je zjištění množství potřebného spalovacího vzduchu a množství vyprodukovaných spalin. Pro tyto výpočty nám posloužilo zadané složení zemního plynu a jeho výhřevnost. Na stechiometrii plynule navazuje výpočet tepelné bilance kotle ($34,4 \text{ MJ/m}^3$), jeho ztráty, tepelná účinnost (94,95 %), výrobní teplo páry (158,12 MW) a množství potřebného paliva ($4,86 \text{ m}^3/\text{s}$).

Při samotném návrhu úprav a výpočtů se vycházelo z původního konstrukčního výkresu a informací od konzultanta. Při přepočtu byl kotel rozdělen na pomyslné oblasti a ty byly postupně propočítány od spalovací komory až po OVZ. Po hrubém přepočtu bylo nutno udělat dvě zásadní úpravy kotle. Pro dosažení vhodné teploty na výstupu ohniště bylo nutné původní spalovací komoru upravit. Po úpravě výšky komory a rozmístění dvou a dvou hořáků do bočních stěn kotle bylo dosaženo teploty spalin na konci ohniště $1225,3 \text{ °C}$. Druhá úprava spočívala v prodloužení druhého tahu kotle. K zabránění úniku tepla byla ještě navíc zazděna výsypka pod přechodovým tahem.

Na návrh ohniště navazuje výpočet teplosměnných ploch. Většina stanovených oblastí obsahuje několik paralelně řazených ploch, proto je výpočet dosti obsáhlý. Výstupem výpočtu každé oblasti byla odchozí teplota spalin počítané oblasti, která sloužila jako vstupní hodnota pro výpočet oblasti následující. Správnost a přesnost každé počítané oblasti stanovuje doporučení, při kterém se hodnoty tepelných výkonů z bilance spalin a přenosu tepla ploch v dané části musí vejít do tolerance $\pm 2 \%$ pro přehříváky a $\pm 5 \%$ pro mříže. Při výpočtu byly veškeré tyto hodnoty dodrženy. Za zmínění stojí hlavně poslední dvě oblasti, a to oblast EKA1 navrhovaného a oblast OVZ. Tyto dvě oblasti původní kotel neobsahoval a musely být navrženy. EKO1 navrhované o výkonu $3226,8 \text{ kJ/m}^3$ navazuje v druhém tahu kotle na EKO2 původní. Poslední výhřevnou plochou je již zmíněný trubkový OVZ, který má za úkol snížit komínovou ztrátu a tedy teplotu spalin na výstupu z kotle, ta v tomto případě činí 119 °C . Současně nesmí teplota ohřátého vzduchu z hlediska omezení emisí NO_x přesáhnout 150 °C .

Největší požadavek v problematice tvorby NO_x je kladen na hořáky, jejichž správným nastavením a provozem je možné tuto tvorbu eliminovat. Pokud se budeme dále bavit o NO_x termických, cílem bylo co nejvíce snížit teplotu v ohništi, výpočtem byla dosažena adiabatická teplota $2006,7 \text{ °C}$. Toho bylo dosaženo použitím nízkoemisních hořáků s podstechiometrickým přívodem primárního vzduchu do hořáků (0,7). Dále pak recirkulací spalin s koeficientem recirkulace 0,12, celkovým nízkým přebytkem vzduchu 1,05 a ohřevem spalovacího vzduchu na teplotu 147 °C .

20 Seznam použité literatury

- [1] Budaj, F.: Parní kotle podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT, Brno 1992
- [2] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skriptum ČVUT, Praha 1999
- [3] Software Microsoft Office Excel 2007
- [4] Software XSteam – IAPWS IF97 Excel Steam Tables by Magnus Holmgren, www.x-eng.com

21 Seznam obrázků

Obr. 1 I-t diagram spalín.....	20
Obr. 2 Pilový diagram.....	33
Obr. 3 Oblast DP (uvedené hodnoty jsou v °C)	34
Obr. 4 Oblast P32 (uvedené hodnoty jsou v °C)	52
Obr. 5 Oblast P31 (uvedené hodnoty jsou v °C)	66
Obr. 6 Oblast P12 (uvedené hodnoty jsou v °C)	74
Obr. 7 Oblast P11 (uvedené hodnoty jsou v °C)	93
Obr. 8 Oblast EKA2 (uvedené hodnoty jsou v °C)	103
Obr. 9 Oblast OVZ (uvedené hodnoty jsou v °C)	107
Obr. 10 Oblast EKA1 (uvedené hodnoty jsou v °C)	112

22 Seznam tabulek

Tab. 2-1 Složení zemního plynu a jeho výhřevnost	16
Tab. 2-2 Entalpie složek spalín.....	19
Tab. 2-3 I-t tabulka vzduchu a produktů spalování	20

23 Seznam použitých symbolů

A, B, C	m	rozměr spalínového kanálu
a	-	stupeň černosti plamene
a_0	-	stupeň černosti ohniště
a_{st}	-	stupeň černosti povrchu stěn
a_{pl}	-	efektivní stupeň černosti plamene
a_{sv}	-	stupeň černosti svítivé části plamene
a_{ns}	-	stupeň černosti nesvítivé části plamene
Bo	-	Boltzmanovo číslo
c	kJ/m^3K	měrné teplo
c_s	-	oprava svazku
c_z	-	oprava na počet podélných řad
D	m	vnější průměr trubky
d	m	vnitřní průměr trubky
d_e	m	ekvivalentní průměr
f	m^2	průřez pro páru, vodu
f	-	součinitel vlhkosti vzduchu
F_{sp}, F_1, F_2	m^2	světlý průřez kanálu
$F_{ús}$	m^2	účinná sálavá plocha
F_{st}	m^2	povrch stěn
h_k	m	výška hořáku
h_c	m	výška ohniště
i_p	kJ/m^3	fyzické teplo paliva
i_{pp}	kJ/kg	entalpie přehřáté páry
i_{nv}	kJ/m^3	entalpie napájecí vody
Δi	kJ/m^3	rozdíl entalpií
i_1	kJ/kg	entalpie média na vstupu
i_2	kJ/kg	entalpie média na výstupu
I_0	kJ/m^3	entalpie spalín na konci ohniště
I_1	kJ/m^3	vstupní entalpie spalín
I_2	kJ/m^3	výstupní entalpie spalín
I_u	kJ/m^3	užitečné teplo uvolněné v ohništi
I_{SPod}	kJ/m^3	entalpie spalín na konci kotle

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

I_{SP}	kJ/m^3	entalpie spalin
I_{SPmin}	kJ/m^3	minimální entalpie spalin
I_{SPr}	kJ/m^3	entalpie spalin s recirkulací
I_{VZ}	kJ/m^3	entalpie vzduchu
I_{VZmin}	kJ/m^3	minimální entalpie vzduchu
k	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel prostupu tepla
k_{sp}	$1/\text{mMPa}$	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
k_c	$1/\text{mMPa}$	součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
l_{tl}	m	délka trubky
M	-	součinitel (výpočet ohniště)
M_{pv}, M_p	m^3/s	množství paliva
M_{pp}	kg/s	množství přehřáté páry
M_{nv}	kg/s	množství napájecí vody
M_o	kg/s	množství odluhu
M_{op}	kg/s	množství odběru páry
M_{mp}	kg/s	množství do mezipřehříváku páry
n_{tr}	-	počet trubek
n_h	-	počet hadů
n_1, n_2	-	počet hořáků
O	m	obvod průřezu kanálu
O_{SPmin}	m^3/m^3	minimální množství spalin
O_{SP}	m^3/m^3	skutečné množství spalin
O_{SPod}	m^3/m^3	množství spalin na výstupu kotle
O_{SPr}	m^3/m^3	množství spalin s recirkulací spalin
O_r	m^3/m^3	množství recirkulovaných spalin
O_{VZmin}	m^3/m^3	minimální objem vlhkého vzduchu
O_{VZ}	m^3/m^3	skutečné množství vzduchu
$O_{SP.C}$	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	střední celkové měrné teplo spalin
p	MPa	tlak
p_{nv}	MPa	tlak napájecí vody
p_{SP}	MPa	celkový parciální tlak
Pr	-	Prandtlovo číslo
Q_b	kJ/m^3	bilanční teplo

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

Q_v	kJ/m^3	teplo ze sdílení tepla spalín a média, výrobní teplo páry
Q_p^p	kJ/m^3	teplo přivedené do kotle
Q_i^r	kJ/m^3	výhřevnost paliva
Q_{vzv}	kJ/m^3	teplo přivedené vzduchem
Q_s	kJ/m^3	množství tepla odevzdané v ohništi do stěn
q	kW/m^2	střední tepelné zatížení stěn ohniště
q_v	kW/m^3	objemové zatížení ohniště
r	-	koeficient recirkulace
r_{H_2O}	-	objemová část vodní páry
r_{RO_2}	-	objemová část tříatomových plynů
r_{sp}	-	součet objemových částí tříatomových plynů
s	m	efektivní tloušťka sálavé vrstvy
S	m^2	výhřevná plocha
s_1	m	příčná rozteč
s_2	m	podélná rozteč
t	$^{\circ}\text{C}$	teplota
t_1	$^{\circ}\text{C}$	vstupní teplota média
t_2	$^{\circ}\text{C}$	výstupní teplota média
t_{st}^m	$^{\circ}\text{C}$	střední teplota média
t_z	$^{\circ}\text{C}$	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
Δt	$^{\circ}\text{C}$	teplotní spád
Δt_m	$^{\circ}\text{C}$	menší rozdíl teplot
Δt_v	$^{\circ}\text{C}$	větší rozdíl teplot
T	K	střední teplota spalín
T_0	K	teplota spalín na konci ohniště
T_a	K	teplota nechlazeného plamene
T_z	K	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$tl.$	m	tloušťka stěny trubky
v	m^3/kg	měrný objem média
V_0	m^3	objem ohniště
V_{abh}	m^3	objem ohniště (kvádr)
V_{vwb}	m^3	objem ohniště (výsypka)

Plynofikace uhelného kotle 210 t/h; 13,63 MPa; 540 °C

V_{yub}	m^3	objem ohniště (nos)
w	m/s	rychlost spalin, média
x_i	-	úhlový součinitel
x_h	-	poměrná výška hořáků
Δx	-	oprava (hořáky)
z	-	počet řad
Z_{co}	%	ztráta hořlavinou ve spalinách
Z_{so}	%	ztráta sdílením tepla
Z_k	%	komínová ztráta
Z_c	%	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
α, α_0, β	-	přebytek vzduchu
α_1	W/m^2K	součinitel přestupu tepla na straně spalin
α_2	W/m^2K	součinitel prostupu tepla na straně média
α_k	W/m^2K	součinitel prostupu tepla konvekcí
α_s	W/m^2K	součinitel prostupu tepla sáláním
ω	-	součinitel omývání desek
ξ	-	součinitel zanesení stěn
η	$Pa\cdot s$	dynamická viskozita
η_k	%	tepelná účinnost kotle
λ	W/mK	součinitel tepelné vodivosti
ν	m^2/s	kinematická viskozita
σ_1	-	poměrná příčná rozteč
σ_2	-	poměrná podélná rozteč
σ'_2	-	poměrná úhlopříčná rozteč
π	-	Ludolfovo číslo
φ	-	součinitel uchování tepla
ψ	-	součinitel tepelné efektivity
ϑ_0	°C	teplota na konci ohniště
ϑ_a	°C	teplota nechlazeného plamene

24 Seznam použitých zkratk

EKO	ekonomizér
DP	deskový přehřívák
OVZ	ohřívák vzduchu
PBS	první brněnská strojírna
ZP	zemní plyn
ZTR	závěsné trubky

25 Seznam příloh

1. Výkres kotle