VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE


# PLYNOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ VYSOKOPECNÍHO A KOKSÁRENSKÉHO PLYNU O VÝKONU 220 T/H

GAS BOILER - 220 T/H

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS


AUTOR PRÁCE — Bc. Jan Flodr
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
SUPERVISOR



BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

# Zadání diplomové práce

| | |
|---|---|
| Ústav: | Energetický ústav |
| Student: | **Bc. Jan Flodr** |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Energetické inženýrství |
| Vedoucí práce: | **doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.** |
| Akademický rok: | 2019/20 |

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

## Plynový kotel na spalování vysokopecního a koksárenského plynu o výkonu 220 t/h

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce je zaměřena na návrh plynového kotle pro spalování vysokopecního a koksárenského plynu o výkonu 220 t/h, při parametrech páry 9,8 MPa a 540°C. Bude obsahovat stechiometrický a tepelný výpočet kotle dle detailního zadání a rozměrový návrh kotle, včetně základní výkresové dokumentace kotle. Bude spalován vysokopecní plyn se stabilizací 5 % zemním plynem, který bude respektovat požadavek na vysokou účinnost kotle. Kotel bude moderní konstrukce, která je ovlivněna podmínkami dopravního profilu na místo stavby.
Kotel bude řešen jako přetlakový s dodatkovým tahem se společnou stěnou se spalovací komorou, konvekčním výparníkem a výhřevnými plochami ohříváku vody (EKO) a přehříváky páry s regulací teploty páry vstřikem napájecí vodou.
Parametry kotle: výkon kotle 220 t/h, tlak přehřáté páry 9,8 MPa, teplota přehřáté páry 540 °C, teplota napájecí vody 220 °C. Bližší specifikace zadání, zejména parametrů kotle a složení paliva, provedena v rámci vypracování DP.

**Cíle diplomové práce:**

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle.
Vyčíslete dosaženou účinnost kotle při vztažné teplotě 25 °C.
Stanovte bilanci vstřiku.

**Seznam doporučené literatury:**

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce

DLOUHÝ, Tomáš: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-1-03757-7

BUDAJ, Florian: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983,

BALÁŠ, Marek: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

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

V Brně, dne

L. S.

| | |
|---|---|
| doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. | doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. |
| ředitel ústavu | děkan fakulty |

# ABSTRAKT

Pro zadané parametry páry a napájecí vody je vytvořen tepelný a rozměrový návrh kotle na spoluspalování vysokopecního plynu se stabilizací 10 % zemním plynem, který respektuje požadavek na vysokou účinnost.

**Klíčová slova**

Kotel, stechiometrie, spalovací komora, teplosměnná plocha, přehřívák, výparník, ekonomizér

# ABSTRACT

For set parameters of a steam and a boiler feed water is designed a thermal and dimensional plan of the boiler, allowing high efficient requests. A boiler is used for combustion of blast furnace gas contains 10% of a natural gas used as a stabilisation element.

**Key words**

Boiler, stoichiometry, combustion chamber, heat transfer surface area, superheater, evaporator, economizer.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FLODR, Jan. *Plynový kotel na spalování vysokopecního a koksárenského plynu o výkonu 220 t/h* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124240. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *diplomovou práci* na téma **Plynový kotel na spalování vysokopecního a koksárenského plynu o výkonu 220 t/h** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

| 25. 06. 2020 | Jan Flodr |
| --- | --- |
| Datum | *Jméno a příjmení* |

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Mirko Hudečkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Hlavní dík patří mé rodině, která mě po dobu celého studia nepřetržitě podporovala.

# OBSAH

ÚVOD ..... 15
1 Charakteristika spalovaných paliv ..... 16
2 Stechiometrické výpočty ..... 17
2.1 Minimální objemy vzduchu a spalin ..... 17
2.2 Dílčí objemy složek suchých spalin ..... 18
2.3 Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy spalin a vzduchu ..... 19
2.4 Entalpie vzduchu a spalin ..... 20
3 Tepelná bilance kotle ..... 23
3.1 Tepelné ztráty kotle a účinnost ..... 23
3.1.1 Ztráta chemickým nedopalem ..... 23
3.1.2 Ztráta sdílením tepla do okolí ..... 23
3.1.3 Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta) ..... 23
3.2 Účinnost kotle ..... 24
3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva ..... 24
4 Spalovací komora ..... 25
5 Tepelná bilance ..... 29
5.1 Přehřívák P4 ..... 29
5.2 Přehřívák P3 ..... 29
5.3 Přehřívák P2 ..... 30
5.4 Přehřívák 1 ..... 31
5.5 Závěsné trubky ..... 32
5.6 Výparník ..... 32
5.7 Ekonomizér ..... 33
5.8 Nedohřev ..... 33
5.9 Odluh ..... 34
Teplosměnné plochy ..... 35
6 Oblast přehříváku P1 ..... 36
6.1 Přehřívák P1 ..... 36
6.1.1 Přestup tepla konvekcí ..... 37
6.1.2 Přestup tepla sáláním spalin ..... 38
6.1.3 Prostup tepla ..... 39
6.2 Závěsné trubky ..... 40
6.2.1 Přestup tepla konvekcí ..... 40
6.2.2 Přestup tepla sáláním ..... 41
6.2.3 Prostup tepla ..... 41
6.3 Membránová stěna ..... 42
6.3.1 Přestup tepla sáláním ..... 42
6.3.2 Prostup tepla ..... 42
6.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P1 ..... 43
7 Oblast přehříváku P3 ..... 44
7.1 Přehřívák P3 ..... 44

7.1.1 Přestup tepla konvekcí ..... 45
7.1.2 Přestup tepla sáláním spalin ..... 46
7.1.3 Prostup tepla ..... 47
7.2 Závěsné trubky ..... 48
7.2.1 Přestup tepla konvekcí ..... 48
7.2.2 Přestup tepla sáláním ..... 49
7.2.3 Prostup tepla ..... 49
7.3 Membránová stěna ..... 49
7.3.1 Přestup tepla sáláním ..... 50
7.3.2 Prostup tepla ..... 50
7.3.3 Tepelná bilance oblasti přehříváku P3 ..... 51
8 Oblast přehříváku P4 ..... 52
8.1 Přehřívák P4 ..... 52
8.1.1 Přestup tepla konvekcí ..... 53
8.1.2 Přestup tepla sáláním ..... 53
8.1.3 Prostup tepla ..... 55
8.2 Závěsné trubky ..... 56
8.2.1 Přestup tepla konvekcí ..... 56
8.2.2 Přestup tepla sáláním ..... 56
8.2.3 Prostup tepla ..... 57
8.3 Membránová stěna ..... 57
8.3.1 Přestup tepla sáláním ..... 57
8.3.2 Prostup tepla ..... 58
8.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P4 ..... 58
9 Oblast přehříváku P2 ..... 59
9.1 Přehřívák P2 ..... 59
9.1.1 Přestup tepla konvekcí ..... 60
9.1.2 Přestup tepla sáláním ..... 60
9.1.3 Prostup tepla ..... 62
9.2 Závěsné trubky ..... 63
9.2.1 Přestup tepla konvekcí ..... 63
9.2.2 Přestup tepla sáláním ..... 63
9.2.3 Prostup tepla ..... 64
9.3 Membránová stěna ..... 64
9.3.1 Přestup tepla sáláním ..... 64
9.3.2 Prostup tepla ..... 65
9.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P2 ..... 65
10 Obratová komora ..... 66
10.1 Závěsné trubky ..... 66
10.1.1 Přestup tepla konvekcí ..... 66
10.1.2 Přestup tepla sáláním ..... 67

10.1.3 Prostup tepla ... 68
10.2 Membránová stěna ... 69
10.2.1 Přestup tepla sáláním ... 69
10.2.2 Prostup tepla ... 69
10.3 Celková bilance oblasti obratové komory 1. tahu ... 70
10.4 Výparníková mříž ... 70
10.4.1 Přestup tepla konvekcí ... 71
10.4.2 Přestup tepla sáláním ... 72
10.4.3 Prostup tepla ... 73
10.4.4 Celková bilance výparníkové mříže ... 73
10.5 Membránová stěna 2. tah ... 74
10.5.1 Přestup tepla konvekcí ... 74
10.5.2 Přestup tepla sáláním ... 74
10.5.3 Prostup tepla ... 76
10.5.4 Celková bilance obratové komory 2. tah ... 77
11 Výparník ... 78
11.1 Konvekční výparník ... 78
11.1.1 Přestup tepla konvekcí ... 79
11.1.2 Prostup tepla ... 80
11.1.3 Tepelná bilance konvekčního výparníku ... 82
12 Ekonomizér ... 83
12.1 Ekonomizér výstupní část (EKO 2) ... 83
12.1.1 Přestup tepla konvekcí ... 84
12.1.2 Prostup tepla ... 85
12.1.3 Tepelná bilance EKO 2 ... 86
12.2 Ekonomizér vstupní část (EKO 1) ... 87
12.2.1 Přestup tepla konvekcí ... 88
12.2.2 Prostup tepla ... 89
12.2.3 Tepelná bilance EKO 1 ... 90
13 Ohřívák vzduchu ... 91
14 Teplota rosného bodu ... 93
15 Kontrola tepelného výkonu ... 94
Závěr ... 95

# ÚVOD

Ačkoliv se klade stále větší důraz na obnovitelné zdroje energie, tak využití fosilních paliv je stále nedílnou součástí energetického mixu. Spalování plynu se řadí mezi fosilními palivy k nejčistším. Vysokopecní plyn není přírodním zdrojem, jedná se o vedlejší produkt ve vysokopecním průmyslu. Proto je jeho využití nejen ekonomicky výhodné, ale i šetrné k zásobám naší planety.

Diplomová práce je zaměřena na návrh kotle na spalování vysokopecního plynu se stabilizací zemním plynem. V první řadě se stanoví složení a výhřevnost směsi plynů. Další krok je stechiometrický výpočet, kterým se určí objemy a složení spalin a vzduchu. Pomocí těchto hodnot se navrhnou ztráty, respektive účinnost, tepelný výkon a rozměry spalovací komory. Dále se určí tepelné výkony každé teplosměnné plochy, které musí souhlasit s celkovým výkonem. Následující kapitoly se věnují podrobnému návrhu jednotlivých teplosměnných ploch. Každá část je popsána geometricky (počet trubek, rozteče, průměry, apod…) i tepelně (prostup tepla, teplotní spád, přenesený výkon, apod…). Důležité je minimalizovat rozdíl mezi navrhnutým a spočítaným výkonem na každé ploše. Je třeba navrhnou celý kotel tak, aby teplota spalin za poslední teplosměnnou plochou byla dostatečně vzdálena od teploty rosného bodu, a tak nedocházelo k nízkoteplotní korozi.

Pokud není napsáno jinak, všechny výpočty jsou řešeny podle [1] a [2] a z podkladů firmy UNIS Power, s.r.o.

# 1 Charakteristika spalovaných paliv

## Vysokopecní plyn BFG

Vysokopecní plyn, nazývaný též kychtový plyn, je plyn, který je vedlejším produktem procesů ve vysokých pecích při výrobě surového železa. Jeho výhřevnost se pohybuje kolem 3,5 MJ/Nm$^3$, a to hlavně kvůli vysokému obsahu dusíku a oxidu uhličitého. Používá se jako pohonná hmota při ocelových stavebních pracích, ale je ho i možné za určitých okolností spalovat. Spaluje se většinou v kombinaci se zemním plynem nebo plynem koksárenským. Díky vysokému obsahu oxidu uhelnatého je vysoce toxický. Kvůli nízké výhřevnosti je většinou nutný předehřev vzduchu a často i plynu. [3]

### Zemní plyn NG

Zemní plyn se vyskytuje většinou společně s ropou nebo v uhelných dolech. Také se nachází vázán v hydrátech pod mořským dnem. Jeho výhřevnost je velmi vysoká kolem 34,1 MJ/Nm$^3$, a tím se řadí mezi velmi kvalitní a čistá paliva. [3]

### Složení paliv

*Tabulka 1: Složení jednotlivých paliv a směsi*

| Směs | | | Vysokopecní plyn BFG – 90 % | | | Zemní plyn NG – 10 % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| výhřevnost | 6,54 | MJ/Nm$^3$ | výhřevnost | 3,5 | MJ/Nm$^3$ | výhřevnost | 33,91 | MJ/Nm$^3$ |
| obsah H2 | 6,77 | % obj | obsah H2 | 7,52 | % obj | obsah CH4 | 97,6 | % obj |
| obsah N2 | 41,65 | % obj | obsah N2 | 46,06 | % obj | obsah C2H6 | 0,4 | % obj |
| obsah CO | 19,46 | % obj | obsah CO | 21,62 | % obj | obsah N2 | 2 | % obj |
| obsah CO2 | 16,92 | % obj | obsah CO2 | 18,8 | % obj | | | |
| obsah H2O | 5,40 | % obj | obsah H2O | 6 | % obj | | | |
| obsah CH4 | 9,76 | % obj | | | | | | |
| obsah C2H6 | 0,04 | % obj | | | | | | |

# 2 Stechiometrické výpočty

Cílem stechiometrických výpočtů je zjištění objemu spalin a objemu vzduchu, které je potřebné pro spálení jednotkového množství paliva. Jedná se tedy o objemové výpočty, u kterých se vychází z chemických reakčních rovnic a bilance látkového množství.

## 2.1 Minimální objemy vzduchu a spalin

**Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 Nm$^3$ plynu**

$$O_{O2\,min} = 0{,}5 \cdot \frac{H_2 + CO}{100} + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot \frac{C_m H_n}{100} \tag{2.1}$$

$$O_{O2\,min} = 0{,}5 \cdot \frac{6{,}77 + 19{,}46}{100} + \left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot \frac{CH_4}{100} \cdot \left(2 + \frac{6}{4}\right) \cdot \frac{C_2H_6}{100}$$

$$O_{O2\,min} = 0{,}328\ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

**Minimální objem suchého vzduchu**

$$O_{SV\,min} = \frac{O_{O2\,min}}{0{,}21} = \frac{0{,}328}{0{,}21} = 1{,}561\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.2}$$

**Minimální objem vlhkého vzduchu**

$$O_{VV\,min} = f \cdot O_{VS\,min} = 1{,}031 \cdot 1{,}561 = 1{,}608\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.3}$$

Součinitelem $f$ bývá obvykle respektován podíl vodní páry připadající na 1 $Nm^3$ suchého vzduchu. Je určen pro relativní vlhkost vzduchu $\varphi = 70\%$ a teplotu vzduchu t = 30°C.

$$f = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_n - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} = 1 + \frac{70}{100} \cdot \frac{4241{,}6}{100000 - \frac{70}{100} \cdot 4241{,}6} = 1{,}031 \tag{2.4}$$

**Objem vodní páry v tomto objemu**

$$O^V_{H20} = O_{VV\,min} - O_{SV\,min} = 1{,}608 - 1{,}561 = 0{,}047\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.5}$$

## 2.2 Dílčí objemy složek suchých spalin

Oxid uhličitý

$$O_{CO2} = \frac{CO_2}{100} + 0{,}994 \cdot \left(\frac{CO}{100} + \sum m \cdot \frac{C_m H_n}{100}\right) + 0{,}0003 \cdot O_{VS\,min} \tag{2.6}$$

$$O_{CO2} = \frac{16{,}92}{100} + 0{,}994 \cdot (\frac{19{,}46}{100} + 1 \cdot \frac{CH_4}{100} + 2 \cdot \frac{C_2H_6}{100}) + 0{,}0003 \cdot 1{,}561$$

$$O_{CO2} = 0{,}461\ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

Dusík

$$O_{N2} = \frac{N_2}{100} + 0{,}7805 \cdot O_{VS\,min} = \frac{41{,}65}{100} + 0{,}7805 \cdot 1{,}561 = 1{,}635\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.7}$$

Argon

$$O_{Ar} = \frac{Ar}{100} + 0{,}0092 \cdot O_{VS\,min} = \frac{0}{100} + 0{,}0092 \cdot 1{,}561 = 0{,}014\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.8}$$

**Výsledný objem suchých spalin**

$$O_{SS\,min} = O_{CO2} + O_{N2} + O_{Ar} = 0{,}461 + 1{,}635 + 0{,}014 = 2{,}11\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.9}$$

**Objem vodní páry ve spalinách**

$$O_{H2O}^S = \frac{H_2O}{100} + \frac{H_2}{100} + \sum \frac{n}{2} \cdot \frac{C_m H_n}{100} + O_{H2O}^V \tag{2.10}$$

$$O_{H2O}^S = \frac{0}{100} + \frac{6{,}77}{100} + \frac{4}{2} \cdot \frac{CH_4}{100} + \frac{6}{2}\frac{C_2H_6}{100} \cdot 0{,}045$$

$$O_{H2O}^S = 0{,}365 \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

**Minimální objem vlhkých spalin**

$$O_{SV\,min} = O_{SS} + O_{H2O}^S = 2{,}11 + 0{,}365 = 2{,}475\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \tag{2.11}$$

## 2.3 Součinitel přebytku vzduchu a skutečné objemy spalin a vzduchu

Spalování ve skutečnosti neprobíhá s minimálním množstvím spalovacího vzduchu (α = 1). Nedošlo by k dokonalému promísení a spálení veškerého paliva. Proto se součinitel přebytku vzduchu volí α > 1. V mém případě volím α = 1,15.

**Skutečný objem vlhkých spalin**

$$O_{SP} = O_{SV\,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\,min} = 2{,}421 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}608 = 2{,}716\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \qquad (2.12)$$

**Skutečný objem vlhkého vzduchu**

$$O_{VZ} = \alpha \cdot O_{VV\,min} = 1{,}15 \cdot 1{,}608 = 1{,}85\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \qquad (2.13)$$

**Skutečné množství jednotlivých složek**

Skutečný objem $CO_2$ ve spalinách

$$O_{CO2} = (\alpha - 1) \cdot O_{VS\,min} \cdot 0{,}0003 + O_{CO2\,min} \qquad (2.14)$$

$$O_{CO2} = (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}561 \cdot 0{,}0003 + 0{,}461$$

$$O_{CO2} = 0{,}461\ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

Skutečný objem $O_2$ ve spalinách

$$O_{O2} = (\alpha - 1) \cdot O_{VS\,min} \cdot 0{,}21 \qquad (2.15)$$

$$O_{O2} = (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}561 \cdot 0{,}21$$

$$O_{O2} = 0{,}049\ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

Skutečný objem $N_2$ ve spalinách

$$O_{N2} = (\alpha - 1) \cdot O_{VS\,min} \cdot 0{,}7805 + O_{N2\,min} \qquad (2.16)$$

$$O_{N2} = (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}561 \cdot 0{,}7805 + 1{,}635$$

$$O_{N2} = 1{,}817\ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

Skutečný objem Ar ve spalinách

$$O_{Ar} = (\alpha - 1) \cdot O_{VS\,min} \cdot 0{,}0092 + O_{Ar\,min} \tag{2.17}$$

$$O_{Ar} = (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}561 \cdot 0{,}0092 + 0{,}014$$

$$O_{Ar} = 0{,}017 \ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

Skutečný objem $H_2O$ ve spalinách

$$O_{H2O} = (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS\,min} + O_{H2O\,min} \tag{2.18}$$

$$O_{H2O} = (1{,}0306 - 1) \cdot (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}561 + 0{,}311$$

$$O_{H2O} = 0{,}372 \ \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

## 2.4 Entalpie vzduchu a spalin

*Tabulka 2: Měrná entalpie složek spalin*

| | Měrná entalpie složek spalin [kJ/Nm$^3$] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t [°C] | CO2 | SO2 | N2 | Ar | H2O | such. vz. | CO | O2 |
| 100 | 170 | 191,2 | 129,5 | 93,07 | 150,6 | 132,3 | 132,3 | 131,7 |
| 200 | 357,5 | 394,1 | 259,9 | 186 | 304,5 | 266,2 | 261,4 | 267 |
| 300 | 558,8 | 610,4 | 392,1 | 278,8 | 462,8 | 402,5 | 395 | 406,8 |
| 400 | 771,9 | 836,5 | 526,7 | 371,7 | 625,9 | 541,7 | 531,7 | 550,9 |
| 500 | 994,4 | 1070 | 664 | 464,7 | 794,5 | 684,1 | 671,6 | 698,7 |
| 600 | 1225 | 1310 | 804,3 | 557,3 | 968,8 | 928,6 | 814,3 | 849,9 |
| 700 | 1462 | 1554 | 947,3 | 650,2 | 1149 | 978,6 | 960,4 | 1003 |
| 800 | 1705 | 1801 | 1093 | 743,1 | 1335 | 1129 | 1109 | 1159 |
| 900 | 1952 | 2052 | 1241 | 835,7 | 1526 | 1283 | 1260 | 1318 |
| 1000 | 2203 | 2304 | 1392 | 928,2 | 1723 | 1439 | 1413 | 1477 |
| 1100 | 2458 | 2540 | 1544 | 1020 | 1925 | 1597 | 1567 | 1638 |
| 1200 | 2716 | 2803 | 1698 | 1114 | 2132 | 1756 | 1723 | 1802 |
| 1300 | 2976 | 3063 | 1853 | 1207 | 2344 | 1916 | 1881 | 1965 |
| 1400 | 3239 | 3323 | 2009 | 1300 | 2559 | 2077 | 2040 | 2129 |
| 1500 | 3503 | 3587 | 2166 | 1393 | 2779 | 2240 | 2199 | 2293 |

*Tabulka 3: Entalpie spalin a vzduchu*

| t [°C] | I $SP_{min}$[kJ/$Nm^3$] | I $VZ_{min}$[kJ/$Nm^3$] | I SP alfa [kJ/$Nm^3$] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | kJ/Nm3 | kJ/Nm3 | alfa = 1,15 | alfa = 1,5 | alfa = 2 |
| 100 | 338,2407 | 213,6617 | **370,28** | 445,0715 | 551,9024 |
| 200 | 687,0431 | 429,978 | **751,53** | 902,0321 | 1117,021 |
| 300 | 1046,516 | 650,25 | **1144,05** | 1371,641 | 1696,766 |
| 400 | 1416,845 | 875,2769 | **1548,13** | 1854,484 | 2292,122 |
| 500 | 1797,634 | 1105,56 | **1963,46** | 2350,414 | 2903,194 |
| 600 | 2188,828 | 1495,455 | **2413,14** | 2936,555 | 3684,283 |
| 700 | 2589,225 | 1582,092 | **2826,53** | 3380,271 | 4171,317 |
| 800 | 2998,607 | 1825,691 | **3272,46** | 3911,452 | 4824,298 |
| 900 | 3415,143 | 2075,148 | **3726,41** | 4452,717 | 5490,291 |
| 1000 | 3840,293 | 2328,012 | **4189,49** | 5004,299 | 6168,305 |
| 1100 | 4270,467 | 2584,236 | **4658,11** | 5562,585 | 6854,703 |
| 1200 | 4706,881 | 2842,26 | **4901,15** | 6128,011 | 7549,14 |
| 1300 | 5147,393 | 3102,083 | **5340,36** | 6698,434 | 8249,475 |
| 1400 | 5591,856 | 3363,61 | **5796,39** | 7273,66 | 8955,465 |
| 1500 | 6039,97 | 3628,497 | **6084,24** | 7854,219 | 9668,467 |

**Ukázka výpočtu entalpie minimálního objemu spalin (α = 1, t = 100 °C)**

$$I_{SPmin} = O_{CO2\,min} \cdot i_{CO2} + O_{N2\,min} \cdot i_{N2} + O_{Ar\,min} \cdot i_{Ar} + O_{H2O\,min} \cdot i_{H2o} \quad (2.19)$$

$$I_{SPmin} = 0{,}461 \cdot 170 + 1{,}635 \cdot 129{,}5 + 0{,}014 \cdot 93{,}07 + 0{,}311 \cdot 150{,}6$$

$$I_{SPmin} = 338{,}2407 \text{ kJ/Nm}^3$$

**Ukázka výpočtu entalpie minimálního množství vzduchu (α = 1, t = 100 °C)**

$$I_{VZ\,min} = O_{VS\,min} \cdot i_{VS} + O_{H2O} \cdot i_{H2O} \quad (2.20)$$

$$I_{VZ\,min} = 1{,}561 \cdot 132{,}3 + 0{,}048 \cdot 150{,}6$$

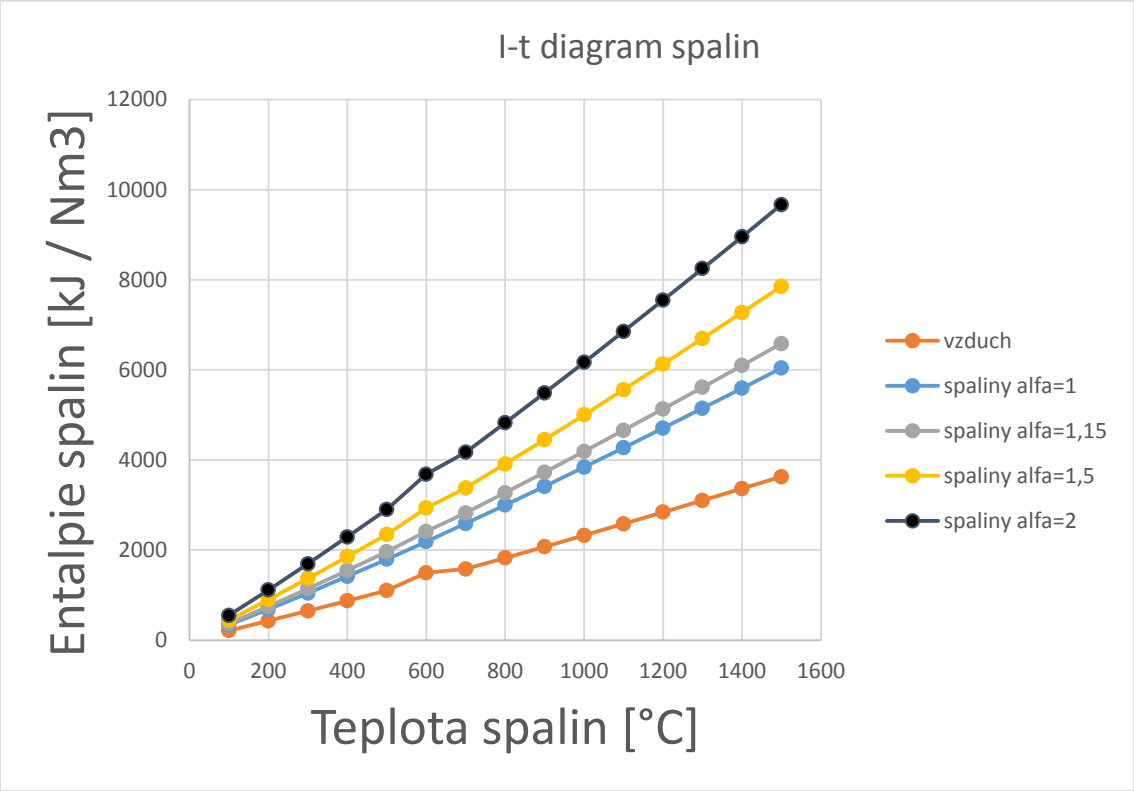
$$I_{VZ\,min} = 213{,}662 \text{ kJ/Nm}^3$$

**Ukázka výpočtu entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu (α = 1,15, t = 100 °C)**

$$I_{SP\,\alpha} = I_{SP\,min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ\,min} \quad (2.21)$$

$$I_{SP\,\alpha} = 338{,}2407 + (1{,}15 - 1) \cdot 213{,}662$$

$$I_{SP\,\alpha} = 370{,}29 \text{ kJ/Nm}^3$$




*Obrázek 1: I-t diagram vzduchu a spalin v závislosti na přebytku vzduchu*

# 3 Tepelná bilance kotle

Na kotel se v tepelné bilanci pohlíží jako na energetický stroj, který transformuje chemicky vázanou energii v palivu do pracovního média. V našem případě je palivo směs plynu vysokopecního a zemního. Pracovním médiem je pára.

**Redukovaná výhřevnost**

$$Q_{i\,red} = Q_i^r + Q_{cz} = 6541 + 11{,}85 = 6552{,}85\ \frac{kJ}{Nm^3} \tag{3.1}$$

**Teplo pro předehřev vzduchu**

$$Q_{cz} = \beta_{OVZ} \cdot \Delta I_{VV\,min} \tag{3.2}$$

$\beta_{OVZ}$ je součinitel přebytku vzduchu na vstupu do OVZ a $\Delta I_{VV\,min}$ je zvýšení entalpie stechiometrického množství vzduchu po ohřátí.

## 3.1 Tepelné ztráty kotle a účinnost

Vzhledem k tomu, že spalujeme plyn, tak ztráta mechanickým nedopalem a ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je nulová.

### 3.1.1 Ztráta chemickým nedopalem

Ztrátu chemickým nedopalem $Z_{CO}$, jinak též ztráta hořlavinou ve spalinách, vyjadřuje teplo, které zůstalo ve spalinách kvůli nespáleným plynům. U plynných paliv se určuje obvykle pouze koncentrace CO ve spalinách. Pro kotle spalující plynná paliva je $O_{2\,ref} = 3\ \%$ a $mgCO = 200\ \frac{mg}{Nm^3}$.

$$Z_{CO} = \frac{0{,}2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS\,min}}{(21 - O_{2\,ref}) \cdot Q_{i\,red}} \cdot 100 = \frac{0{,}2116 \cdot 200 \cdot 2{,}11}{(21 - 3) \cdot 6552{,}85} = 0{,}078\ \% \tag{3.3}$$

### 3.1.2 Ztráta sdílením tepla do okolí

Ztráta sdílením tepla do okolí je určena podle grafu v závislosti na parním výkonu kotle a druhu nátěru oplechování.

$Z_{sv} = 0{,}48\ \%$

### 3.1.3 Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)

Komínová ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Jedná se o nejvýznamnější ztrátu kotle.

$$Z_k = \frac{I_S^{t_k,\alpha_k} - \alpha_k I_{VZ}}{Q_{i\,red}} = \frac{541{,}85 - 1{,}15 \cdot 53{,}42}{6552{,}85} = 7{,}33\ \% \tag{3.4}$$

$I_S^{t_k,\alpha_k}$ je entalpie spalin při teplotě $t_k$ a přebytku vzduchu $\alpha_k$ za kotlem.

## 3.2 Účinnost kotle

Účinnost kotle určíme nepřímou metodou, a to odečtením ztrát od 100 %. Od celkové účinnosti se odečítá navíc ztráta nepočitatelné (rezervní) $Z_r = 0{,}22$.

$$\eta_k = 100 - Z_{CO} - Z_{sv} - Z_k - Z_r = 100 - 0{,}078 - 0{,}48 - 7{,}33 - 0{,}22 = 91{,}9\ \% \tag{3.5}$$

## 3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

### Výrobní teplo

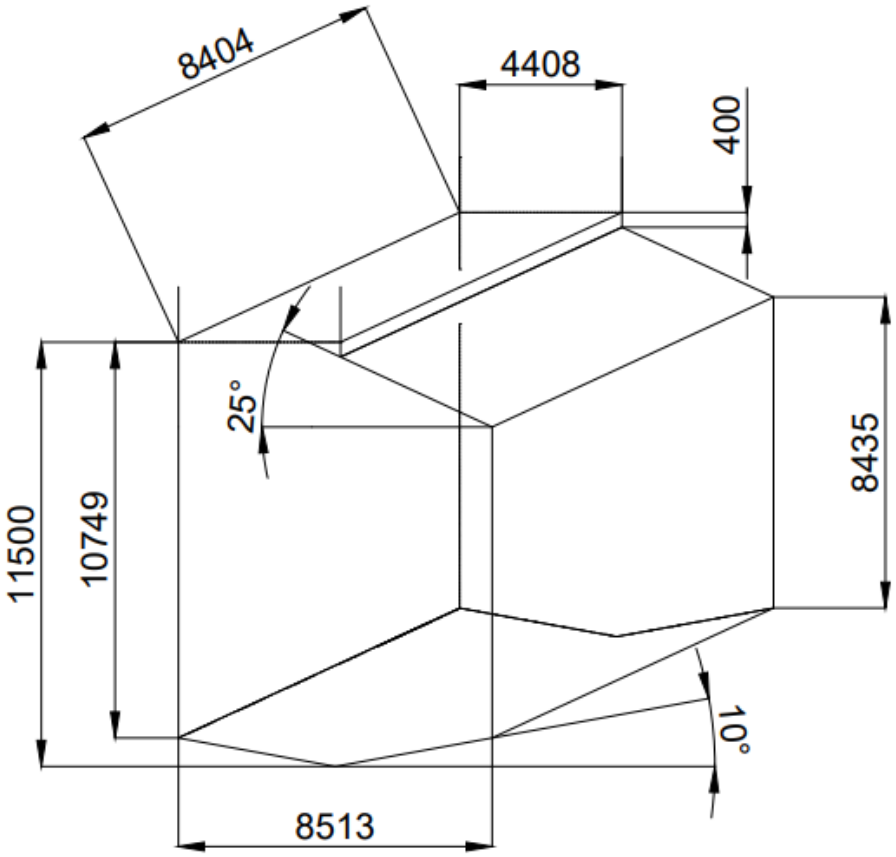
$$Q_v = M_{pp} \cdot \left(i_{pp} - i_{NV}\right) = 61{,}11 \cdot (3479 - 946) = 154799\ kW \tag{3.6}$$

### Množství paliva

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{i\,red} \cdot \eta_k} = \frac{154799}{6552{,}85 \cdot 0{,}9218} = 25{,}74\ \frac{Nm^3}{s} \tag{3.7}$$

# 4 Spalovací komora

Spalovací komora, též nazývána jako ohniště, je tepelně nejexponovanější část kotle. Teploty i tepelné toky zde dosahují nejvyšších hodnot. Komora je tvořena membránovou stěnou, které je součástí výparníkového systému, a tím je dosaženo potřebného chlazení.




*Obrázek 2: Schéma a základní rozměry spalovací komory*

**Objem spalovací komory**

$V_o = 749{,}1\ m^3$

**Objemové zatížení ohniště**

$$q_v = \frac{M_{pal} \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{25{,}74 \cdot 6541}{749{,}1} = 225{,}15\ \frac{kW}{m^3} \tag{4.1}$$

**Teplota nechlazeného plamene**

Teplotu nechlazeného plamene určíme z I-t diagramu. Nejprve je potřeba stanovit entalpii nechlazeného plamene. Ta má stejnou hodnotu jako teplo uvolněné v ohništi $Q_u$.

$$Q_u = Q_{i\,red} \cdot (1 - Z_{co}) + Q_{cz} = 6552{,}85 \cdot (1 - 0{,}01) + 11{,}8 = 6499\ \frac{kJ}{m^3} \tag{4.2}$$

**Entalpie nechlazeného plamene**

$$I_{np}^{t_{np},\alpha_{ok}} = Q_u = 6499\ \frac{kJ}{m^3} \tag{4.3}$$

Této entalpii odpovídá teplota 1896 °C.

Pro určení teploty na konci ohniště je nutné určit Boltzmannovo číslo a stupeň černosti ohniště. Kvůli tomu, že Boltzmannovo číslo je funkcí právě teploty na konci ohniště, je zde nutné použít iterační metodu.

Boltzmannovo číslo určíme podle vztahu, kde $(O_S c_S)$ je střední tepelná jímavost spalin v ohništi, $\psi$ je střední hodnota součinitele tepelné efektivnosti, $S_{st}$ je projekční povrch stěn ohniště a $t_{np}$ je teplota nechlazeného plamene.

$$Bo = \frac{M_p \cdot (O_S c_S)}{5{,}68 \cdot 10^{-11} \cdot \ \psi \cdot S_{st} \cdot \left(273 + t_{np}\right)^3} \tag{4.4}$$

$$Bo = \frac{23{,}27 \cdot 4{,}83}{5{,}68 \cdot 10^{-11} \cdot 0{,}65 \cdot 445{,}7 \cdot (273 + 1482{,}56)^3} = 1{,}2628$$

**Střední hodnota součinitele tepelné efektivnosti**

$$(O_S c_S) = \frac{Q_u - I_S^{t_{np},\alpha_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} = \frac{6499 - 4210}{1896 - 1274} = 4{,}83 \tag{4.5}$$

**Teplota na konci ohniště**

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273{,}15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{Bo}\right)^{0{,}6}} - 273{,}15 = \frac{1896 + 273{,}15}{1 + 0{,}395 \cdot \left(\frac{0{,}526}{0{,}513}\right)^{0{,}6}} = 1275{,}21\ °C \tag{4.6}$$

*M* je součinitel, který respektuje průběh teplot v ohništi, a volím ho 0,395.

**Poměr obsahu uhlíku a vodíku pro původní vzorek**

$$\frac{C^r}{H^r} = 0{,}12 \cdot \sum_i \left(\frac{m}{n}\right) \cdot (C_m \cdot H_n) = \frac{1}{4} \cdot 9{,}76 + \frac{2}{6} \cdot 0{,}04 = 0{,}29 \tag{4.7}$$

**Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí**

$$k_{sz} = 0{,}306 \cdot (2 - \alpha_{ok}) \cdot \left(1{,}6 \cdot \frac{t_{ok} + 273{,}15}{1000} - 0{,}5\right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \tag{4.8}$$

$$k_{sz} = 0{,}306 \cdot (2 - 1{,}15) \cdot \left(1{,}6 \cdot \frac{1275 + 273{,}15}{1000} - 0{,}5\right) \cdot 0{,}29 = 0{,}15$$

**Parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \tag{4.9}$$

**Objemové podíly tříatomových plynů**

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{4.10}$$

Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\ min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\ min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{4.11}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{4.12}$$

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V_O}{S_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{749}{453{,}6} = 5{,}94\ m \tag{4.13}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_{ok} + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{4.14}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0393 \cdot 5{,}94}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{1222{,}6 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 3{,}442$$

**Stupeň černosti svítivé části plamene**

$$a_{sv} = 1 - e^{-(k_S \cdot r_S + k_{sz}) \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-(3{,}442 + 0{,}15) \cdot 0{,}1 \cdot 5{,}94} = 0{,}37 \tag{4.15}$$

**Stupeň černosti nesvítivé části plamene**

$$a_{ns} = 1 - e^{-(k_S \cdot r_S) \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-(3{,}442) \cdot 0{,}1 \cdot 5{,}94} = 0{,}42 \tag{4.16}$$

**Stupeň černosti plamene**

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0{,}1 \cdot 0{,}37 + (1 - 0{,}1) \cdot 0{,}42 = 0{,}418 \tag{4.17}$$

**Stupeň černosti ohniště**

$$a_o = \left(\frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi}\right) = \left(\frac{0{,}418}{0{,}418 \quad + (1 - 0{,}418 \quad) \cdot 0{,}65}\right) = 0{,}526 \qquad (4.18)$$

**Dále můžeme určit teplo uvolněné v ohništi**

$$Q_o = m_p \cdot \left(Q_u - I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}\right) = 25{,}74 \cdot (6499 - 5230) = 32{,}66\ MW \qquad (4.19)$$

# 5 Tepelná bilance

Tepelný výkon (výrobní teplo páry) je 154799 kW. Tomu musí odpovídat tepelný výkon na jednotlivých teplosměnných plochách.

## 5.1 Přehřívák P4

Přehřívák P4 zpracovává entalpický spád $\Delta i_{P4} = 192\ kJ/kg$ a tlakovou ztrátu $\Delta p_{P4} = 0{,}2\ MPa$.

**Výstupní parametry páry (ze zadání)**

$t_{P4\ out} = 540\ °C$

$p_{P4\ out} = 9{,}8\ MPa$

$i_{P4\ out} = f(t_{P4\ out}, p_{P4\ out}) = 3479\ kJ/kg$

**Vstupní parametry páry**

$$p_{P4\ in} = 9{,}8 + \Delta p_{P4} = 9{,}8 + 0{,}2 = 10\ MPa \tag{5.1}$$

$$i_{P4\ in} = i_{P4\ out} - \Delta i_{P4} = 3479 - 192 = 3287\ kJ/kg \tag{5.2}$$

$t_{P4\ in} = f(i_{P4\ in}, p_{P4\ in}) = 466\ °C$

**Tepelný výkon přehříváku P4**

$$\mathrm{Q_{P4}} = \mathrm{M_p} \cdot \Delta \mathrm{i_{P4}} = 61{,}11 \cdot 192 = 11733{,}33\ \mathrm{kW} \tag{5.3}$$

## 5.2 Přehřívák P3

Přehřívák P3 zpracovává entalpický spád $\Delta i_{P3} = 304\ kJ/kg$ a tlakovou ztrátu $\Delta p_{P3} = 0{,}15\ MPa$. Navíc je zde vstřik napájecí vody k regulaci přehřáté páry. Množství vstřiku zde činí 4 % z toku přehřáté páry.

**Vstřik**

$$\mathrm{M_{V3}} = \mathrm{M_p} \cdot 0{,}04 = 2{,}44\ kg/s \tag{5.4}$$

**Tlak na výstupu**

$p_{P3\ out} = p_{P4\ in} = 10\ MPa$

**Entalpie páry na výstupu**

$$\left(M_p - M_{V3}\right) \cdot i_{P3\,out} + M_{V3} \cdot i_{NV} = M_p \cdot i_{P4\,in} \tag{5.5}$$

$$i_{P3\,out} = \frac{M_p \cdot i_{P4\,in} - M_{V3} \cdot i_{NV}}{M_p - M_{V3}} = \frac{61{,}11 \cdot 3287 - 2{,}44 \cdot 945{,}93}{61{,}11 - 2{,}44} = 3373\ kJ/kg$$

$$t_{P3\,out} = f(i_{P3\,out}, p_{P3\,out}) = 499\ °C$$

**Vstupní parametry páry**

$$p_{P3\,in} = p_{P3\,out} + \Delta p_{P3} = 10 + 0{,}15 = 10{,}15\ MPa \tag{5.6}$$

$$i_{P3\,in} = i_{P3\,out} - \Delta i_{P3} = 3373 - 304 = 3069\ kJ/kg \tag{5.7}$$

$$t_{P3\,in} = f(i_{P3\,in}, p_{P3\,in}) = 392\ °C$$

**Tepelný výkon přehříváku P3**

$$Q_{P3} = \left(M_p - M_{V3}\right) \cdot \Delta i_{P3} = (61{,}11 - 2{,}44) \cdot 304 = 17836{,}10\ kW \tag{5.8}$$

## 5.3 Přehřívák P2

Přehřívák P2 zpracovává entalpický spád $\Delta i_{P2} = 196\ kJ/kg$ a tlakovou ztrátu $\Delta p_{P3} = 0{,}2\ MPa$. Navíc se zde nachází vstřik napájecí vody k regulaci přehřáté páry. Množství vstřiku činí 4 % z toku přehřáté páry.

**Vstřik**

$$\mathrm{M_{V3}} = \mathrm{M_{V2}} = 2{,}44\ \mathrm{kg/s} \tag{5.9}$$

**Tlak na výstupu**

$$p_{P2\,out} = p_{P3\,in} = 10{,}15\ MPa$$

**Entalpie páry na výstupu**

$$\left(M_p - M_{V3} - M_{V2}\right) \cdot i_{P2\,out} + M_{V2} \cdot i_{NV} = M_p \cdot i_{P3\,in} \tag{5.10}$$

$$i_{P2\,out} = \frac{M_p \cdot i_{P3\,in} - M_{V2} \cdot i_{NV}}{M_p - M_{V3} - M_{V2}} = \frac{61{,}11 \cdot 3069 - 2{,}44 \cdot 945{,}93}{61{,}11 - 2{,}44 - 2{,}44} = 3150\ kJ/kg$$

$$t_{P2\,out} = f(i_{P2\,out}, p_{P2\,out}) = 416{,}75\ °C$$

**Vstupní parametry páry**

$$p_{P2\,in} = p_{P2\,out} + \Delta p_{P2} = 10{,}15 + 0{,}2 = 10{,}35\ MPa \tag{5.11}$$

$$i_{P2\,in} = i_{P2\,out} - \Delta i_{P2} = 3150 - 196 = 2954\ kJ/kg \tag{5.12}$$

$$t_{P2\,in} = f(i_{P2\,in}, p_{P2\,in}) = 360\ °C$$

**Tepelný výkon přehříváku P2**

$$Q_{P2} = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2}\right) \cdot \Delta i_{P2} = (61{,}11 - 2{,}44 - 2{,}44) \cdot 196 \tag{5.13}$$

$$Q_{P2} = 11020{,}69\ kW$$

## 5.4 Přehřívák 1

Přehřívák P1 zpracovává entalpický spád $\Delta i_{P2} = 126\ kJ/kg$ a tlakovou ztrátu $\Delta p_{P3} = 0{,}05\ MPa$. Navíc se zde nachází vstřik napájecí vody k regulaci přehřáté páry. Množství vstřiku činí zde 3 % z toku přehřáté páry.

**Vstřik**

$$\mathrm{M_{V1}} = M_P \cdot 0{,}03 = 1{,}83\ \mathrm{kg/s} \tag{5.14}$$

**Tlak na výstupu**

$$p_{P1\,out} = p_{P2\,in} = 10{,}35\ MPa$$

**Entalpie páry na výstupu**

$$\left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot i_{P1\,out} + M_{V1} \cdot i_{NV} = M_p \cdot i_{P2\,in} \tag{5.15}$$

$$i_{P1\,out} = \frac{M_p \cdot i_{P2\,in} - M_{V1} \cdot i_{NV}}{M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}} = \frac{61{,}11 \cdot 2954 - 1{,}83 \cdot 945{,}93}{61{,}11 - 2{,}44 - 2{,}44 - 1{,}83} = 3150\ kJ/kg$$

$$t_{P1\,out} = f(i_{P1\,out}, p_{P1\,out}) = 416{,}75\ °C$$

**Vstupní parametry páry**

$$p_{P1\,in} = p_{P1\,out} + \Delta p_{P1} = 10{,}35 + 0{,}05 = 10{,}4\ MPa \tag{5.16}$$

$$i_{P1\,in} = i_{P1\,out} - \Delta i_{P1} = 2954 - 196 = 2888\ kJ/kg \tag{5.17}$$

$$t_{P1\,in} = f(i_{P1\,in}, p_{P1\,in}) = 345\ °C$$

**Tepelný výkon přehříváku P1**

$$Q_{P1} = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot \Delta i_{P1} = (61{,}11 - 2{,}44 - 2{,}44 - 1{,}83) \cdot 12 \quad (5.18)$$

$Q_{P1} = \ 6854{,}54\ kW$

## 5.5 Závěsné trubky

Závěsné trubky slouží k zavěšení (podepření) trubkových svazků přehříváků. Zároveň do nich proudí sytá pára z bubnu, a proto je zde předáno následující teplo. Uvažujeme tlakovou ztrátu $\Delta p_{ZT} = 0{,}1\ MPa$.

**Výstupní parametry páry**

$p_{ZT\ out} = p_{P1\ in} = 10{,}4\ MPa$

$i_{ZT\ out} = i_{P1\ in} = 2888\ kJ/kg$

$t_{ZT\ out} = t_{P1\ in} = 345\ °C$

**Vstupní parametry páry**

$$p_{ZT\ in} = p_{ZT\ out} + \Delta p_{ZT} = 10{,}4 + 0{,}1 = 10{,}5 MPa \quad (5.19)$$

$t_{ZT\ in} = f(p_{ZT\ in}, x = 1) = 317{,}05\ °C$

$i_{ZT\ in} = f(p_{ZT\ in}, t_{ZT\ in}) = 2709\ kJ/kg$

**Tepelný výkon závěsných trubek**

$$Q_{ZT} = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot (i_{ZT\ out} - i_{ZT\ in}) = 54{,}4 \cdot (2888 - 2709) \quad (5.20)$$

$Q_{ZT} = \ 9792{,}2\ kW$

## 5.6 Výparník

Pokud se vezme vypařování jako izobaricko-izotermický děj, tak se může uvažovat vstupní a výstupní hodnoty teploty a tlaku za konstantní. Tyto hodnoty jsou rovny vstupním hodnotám do závěsných trubek.

Vstupní i výstupní parametry páry

$p_{V\ in} = p_{V\ out} = 10{,}4\ MPa$

$t_{V\ in} = t_{V\ out} = 317{,}05\ °C$

$i_{V\ out} = i_{ZT\ in} = 2709\ kJ/kg$

$i_{V\ in} = f(p_{V\ in}, x = 0) = 1425\ kJ/kg$

**Tepelný výkon výparníku**

$$Q_V = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot (i_{V\ out} - i_{V\ in}) = 54{,}4 \cdot (2709 - 1425) \quad (5.21)$$

$$Q_V = 69905{,}4\ kW$$

## 5.7 Ekonomizér

V ekonomizéru je ohřáta napájecí voda pod mez sytosti (3,5 °C).

Výstupní parametry páry

$$p_{E\ out} = p_{V\ in} = 10{,}4\ MPa$$

$$t_{E\ iout} = t_{V\ in} - \Delta t_N = 313{,}55\ °C \quad (5.22)$$

$$i_{E\ out} = f(t_{E\ out}, p_{E\ out}) = 1423\ kJ/kg$$

Vstupní parametry páry

$$p_{E\ in} = p_{E\ out} + \Delta p_E = 10{,}4 + 0{,}4 = 10{,}5\ MPa \quad (5.23)$$

$$t_{E\ in} = t_{NV} = 220\ °C$$

$$i_{E\ in} = f(p_{E\ in}, t_{E\ in}) = 946\ kJ/kg$$

**Tepelný výkon ekonomizéru**

$$Q_E = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot (i_{E\ out} - i_{E\ in}) = 54{,}4 \cdot (1423 - 946) \quad (5.24)$$

$$Q_E = 26275{,}7\ kW$$

## 5.8 Nedohřev

Zde je potřeba započítat nedohřev EKO-buben.

$$p_B = 10{,}8\ MPa$$

$$t_{B1} = 317{,}05\ °C$$

$$t_{B2} = 313{,}55\ °C$$

$$i_{B1} = f(p_B, t_{B1}) = 1444\ kJ/kg$$

$$i_{B2} = f(p_B, t_{B2}) = 1422\ kJ/kg$$

**Tepelný výkon nedohřevu**

$$Q_N = \left(M_p - M_{V3} - M_{V2} - M_{V1}\right) \cdot (i_{B1} - i_{B2}) = 54{,}4 \cdot (1444 - 1422) \quad (5.25)$$

$$Q_N = 1196{,}8\ kW$$

## 5.9 Odluh

**Tepelný výkon odluhu**

$$Q_O = M_O \cdot (i_{B1} - i_{NV}) = 54{,}4 \cdot (1444 - 945{,}94) = 184{,}28\ kW \quad (5.26)$$

**Kontrola bilancí**

$$Q = Q_{P4} + Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} + Q_{ZT} + Q_V + Q_E + Q_N + Q_O \quad (5.27)$$

$$Q = 11733 + 17836 + 11020 + 6854 + 9792 + 69905 + 26275 + 184 + 1196$$

$$Q = 154799\ kW$$

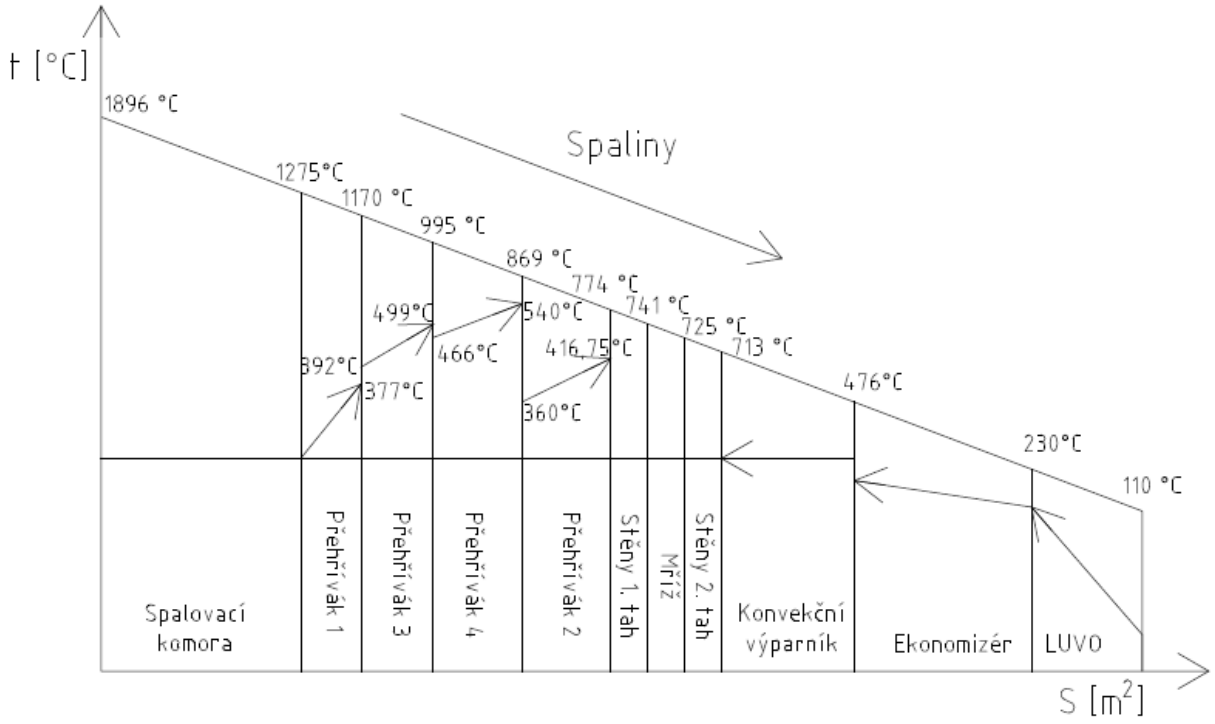
$$\boldsymbol{Q = Q_v}$$

## Teplosměnné plochy

Následující kapitola obsahuje tepelný výpočet a konstrukční návrh jednotlivých teplosměnných ploch. V prvním tahu kotle se nachází čtyři přehříváky, a to postupně P1, P3, P4 a P2. Tyto přehříváky jsou tvořeny hladkými trubkami, které jsou příčně obtékané. Kolmo na ně visí ze stropu závěsné trubky, jež podpírají trubky přehříváků. Za přehřívákem P2 je obratová komora do druhého tahu, ve které se nachází výparníková mříž. Ve druhém tahu se nachází konvekční výparník a druhá část ekonomizéru. Ve třetím tahu se je umístěna první část ekonomizéru a poslední teplosměnnou plochou je ohřívák vzduchu typu Ljungström.

Hlavním cílem návrhu teplosměnných ploch je, aby odpovídal tepelný výkon, který odevzdají spaliny, tomu předanému páře, respektive vodě. Dalším důležitým bodem je, aby spaliny vystupující z komína měli teplotu dostatečně vzdálenou teplotě rosného bodu. Jelikož v palivu není obsažena síra, stačí sledovat teplotu kondenzace vodní páry.

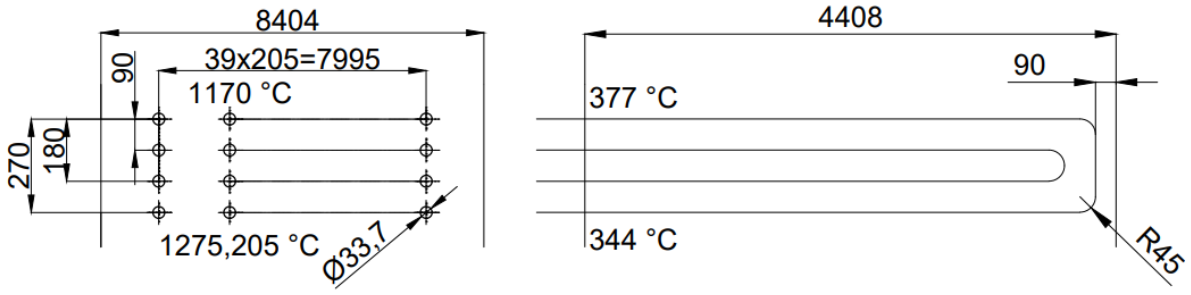
Vlastnosti spalin (kinematická viskozita, součinitel tepelné vodivosti a Prandtlovo číslo) jsou brány pro střední teplotu dané oblasti a vlhkost spalin 13,71 %.




*Obrázek 3: Pilový diagram*

# 6 Oblast přehříváku P1

Hlavní teplosměnnou plochou, nacházející se v této oblasti, je přehřívák P1. Jedná se o souproudý příčně obtékaný trubkový výměník tvořen 40 dvojhady o průměru trubky 33,7 mm a tloušťce trubky 4 mm. Spaliny se ochladí z 1275,205 °C na 1170 °C a pára v přehříváku se ohřeje z 344 °C na 377 °C. Dalšími plochami jsou zde části závěsných trubek a membránové stěny.




*Obrázek 4: Schéma přehříváku P1*

## 6.1 Přehřívák P1

*Tabulka 4: Geometrie přehříváku P1*

| **Rozměry přehříváku P1** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{P1}$ | 33,7 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{P1}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{P1}$ | 25,7 | [mm] |
| Příčná rozteč | $s_1$ | 205 | [mm] |
| Podélná rozteč | $s_2$ | 90 | [mm] |
| Počet příčných řad | $z_1$ | 40 | [-] |
| Počet podélných řad | $z_2$ | 4 | [-] |

**Průtok spalin**

$$V_S = M_{pal} \cdot [O_{SV\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\ min}] = 25{,}74 \cdot [1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61] \quad (6.1)$$

$$V_S = 69{,}91\ \ Nm^3/s$$

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B - n_{ZT} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ZT}^2}{4} - z_1 \cdot D_{P1} \cdot B \cdot 0{,}95 \quad (6.2)$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 340 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}0318^2}{4} - 40 \cdot 0{,}0337 \cdot 4{,}408 \cdot 0{,}95 = 30{,}83\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{1275{,}21 + 1170}{2} = 1222{,}6\ °C \tag{6.3}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{30{,}83} \cdot \frac{273{,}15 + 1222{,}6}{273{,}15} = 12{,}42\ m/s \tag{6.4}$$

### 6.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla pro uspořádání trubek za sebou**

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{6.5}$$

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot 0{,}96 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}13}{0{,}0337} \cdot \left(\frac{12{,}42 \cdot 0{,}0337}{2{,}29 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}56^{0{,}33}$$

$$\alpha_K = 81{,}16 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru**

$$C_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (4 - 2) = 0{,}96 \tag{6.6}$$

**Poměrná přímá rozteč**

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{205}{33{,}7} = 6{,}08 \tag{6.7}$$

**Poměrná podélná rozteč**

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{90}{33{,}7} = 2{,}67 \tag{6.8}$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

Korekční součinitel $C_s = 1$ pro $\sigma_2 \geq 2$.

### 6.1.2 Přestup tepla sáláním spalin

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{6.9}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}22 \cdot 1495{,}75^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{659{,}15}{1495{,}75}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{659{,}15}{1495{,}75}\right)} = 54{,}06\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$$a_{st} = 0{,}8$$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}207} = 0{,}186 \tag{6.10}$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 2{,}776 \cdot 0{,}39 \cdot 0{,}897 = 0{,}207 \tag{6.11}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}0337 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}205 \cdot 0{,}09}{0{,}0337^2} - 1\right) = 0{,}597\ m \tag{6.12}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{6.13}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0393 \cdot 0{,}597}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{1222{,}6 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S = 3{,}442$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{6.14}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\ min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\ min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{6.15}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{6.16}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \tag{6.17}$$

Tlak spalin $p$ se bere $p = 0{,}1\ MPa$.

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 361 + 25 + 273{,}15 = 659{,}15\ K \tag{6.18}$$

Hodnota $t$ je střední teplota pracovního média v trubkách a $\Delta t$ je zvýšení teploty, které se pro spalování plynů volí 25 °C.

### 6.1.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 0{,}95 \cdot 81{,}16 + 54{,}06 = 131{,}16\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.19}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 131{,}16 = 111{,}48\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.20}$$

Hodnota součinitel tepelné efektivnosti $\psi$ se pro spalování plynů volí $\psi = 0{,}85$.

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{930{,}2 - 793}{ln\frac{930{,}2}{793}} = 859{,}78\ °C \tag{6.21}$$

$\Delta t_v = 1275{,}205 - 345 = 930{,}2\ °C$

$\Delta t_m = 1170 - 377 = 793\ °C$

**Potřebná plocha přehříváku**

$$S_{P1} = \frac{Q_{P1}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{6854{,}6386 \cdot 1000}{111{,}48 \cdot 859{,}78} = 71{,}51\ m^2 \tag{6.22}$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{1ř} = 0{,}96 \cdot B \cdot \pi \cdot D_{P1} \cdot z_1 = 0{,}96 \cdot 4{,}408 \cdot \pi \cdot 0{,}0337 \cdot 40 = 17{,}92\ m^2 \quad (6.23)$$

**Počet řad přehříváku**

$$n_{ř} = \frac{S_{P1}}{S_{1ř}} = \frac{71{,}51}{17{,}92} = 3{,}991 \Rightarrow 4 \quad (6.24)$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{skut} = n_{ř} \cdot S_{1ř} = 4 \cdot 17{,}92 = 71{,}68\ m^2 \quad (6.25)$$

**Skutečný výkon přehříváku**

$$Q_{skut} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{skut} \cdot 0{,}001 == 111{,}48 \cdot 859{,}78 \cdot 71{,}68 \cdot 0{,}001 = 6870{,}603\ kW \quad (6.26)$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{skut} - Q_{P1}}{Q_{skut}} \cdot 100 = \frac{6870{,}603 - 6854{,}6386}{6870{,}603} \cdot 100 = 0{,}234\ \% \quad (6.27)$$

## 6.2 Závěsné trubky

*Tabulka 5: Geometrie závěsných trubek*

| **Rozměry závěsných trubek** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{ZT}$ | 31,8 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{ZT}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{ZT}$ | 23,8 | [mm] |
| Počet trubek | $n_{ZT}$ | 340 | [-] |
| Délka trubek | $l_{ZT}$ | 1,8 | [m] |

### 6.2.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}13}{0{,}21} \cdot \left(\frac{12{,}18 \cdot 0{,}21}{2{,}23 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}565^{0{,}4} \quad (6.28)$$

$$\alpha_K = 20{,}50\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 30{,}83}{607{,}32} = 0{,}18\ m \quad (6.29)$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) + \pi \cdot n_{ZT} \cdot D_{ZT} + 2 \cdot (D_{P1} + 0{,}9 \cdot A) \cdot z_1 \tag{6.30}$$

$$O = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) + \pi \cdot 340 \cdot 0{,}0318 + 2 \cdot (0{,}0337 + 0{,}9 \cdot 8{,}404) \cdot 40$$

$$O = 667{,}38\ m$$

### 6.2.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{6.31}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}186 \cdot 1495{,}75^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{629{,}175}{1495{,}75}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{629{,}175}{1495{,}75}\right)} = 52{,}63\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 331{,}025 + 25 + 273{,}15 = 629{,}175\ K \tag{6.32}$$

### 6.2.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 20{,}50 + 52{,}63 = 73{,}13\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.33}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 73{,}13 = 62{,}16\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.34}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{958{,}155 - 825}{ln\frac{958{,}155}{825}} = 899{,}92\ °C \tag{6.35}$$

**Plocha závěsných trubek**

$$S_{ZT1} = \pi \cdot D_{ZT} \cdot n_{ZT} \cdot h_{ZT} = \pi \cdot 0{,}0318 \cdot 340 \cdot 1{,}8 = 61{,}14\ m^2 \tag{6.36}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{ZT1} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{ZT1} \cdot 0{,}001 = 62{,}16 \cdot 899{,}92 \cdot 61{,}14 \cdot 0{,}001 = 3882{,}4\ kW \tag{6.37}$$

## 6.3 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí je u membránové stěny stejný jako u závěsných trubek.

$$\alpha_K = 20{,}5\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 6.3.1 Přestup tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{6.38}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}186 \cdot 1495{,}75^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{1495{,}75}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{1495{,}75}\right)} = 51{,}98\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \tag{6.39}$$

### 6.3.2 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 20{,}50 + 51{,}98 = 72{,}49\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.40}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 72{,}49 = 61{,}61\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{6.41}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{958{,}155 - 852{,}95}{ln\frac{958{,}155}{852{,}95}} = 904{,}53\ °C \tag{6.42}$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS} = 2 \cdot h_{ZT} \cdot (A + B) = 2 \cdot 1{,}8 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) = 46{,}12\ m^2 \quad (6.43)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS} \cdot 0{,}001 = 61{,}61 \cdot 904{,}53 \cdot 46{,}12 \cdot 0{,}001 = 2528{,}96\ kW \quad (6.44)$$

## 6.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P1

**Celkový tepelný výkon v oblasti přehříváku P1**

$$Q_C = Q_{P1} + Q_{ZT} + Q_{MS} = 6870{,}603\ + 3382{,}374 + 2528{,}96 = 12765{,}87\ kW \quad (6.45)$$

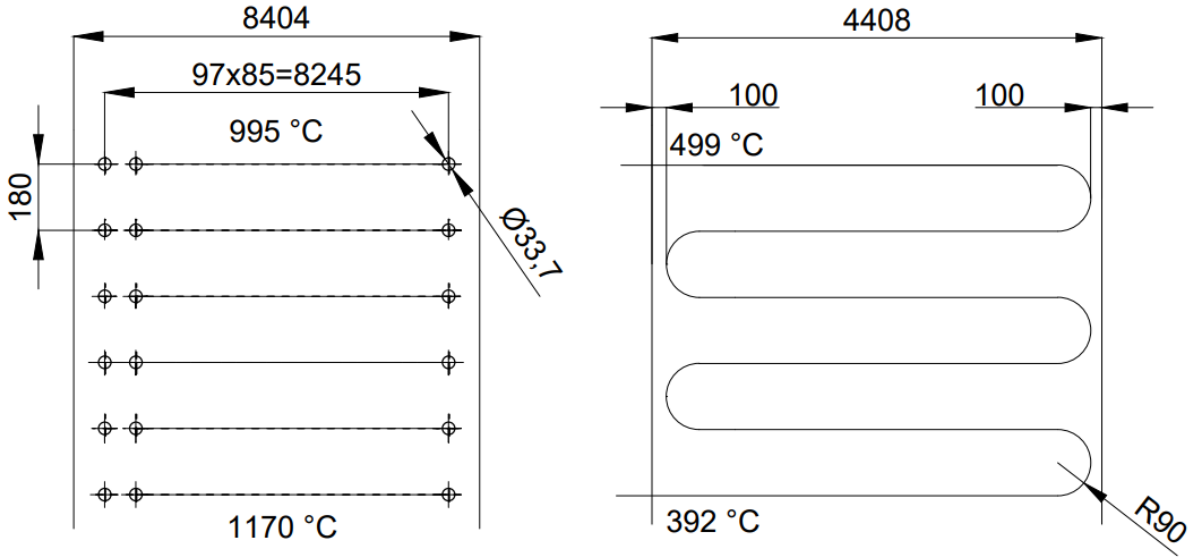
**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 5616{,}3 - \frac{12765{,}87 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 5091{,}3\ \frac{kJ}{Nm^3} \quad (6.46)$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 1170 °C.

# 7 Oblast přehříváku P3

Hlavní teplosměnnou plochou, nacházející se v této oblasti, je přehřívák P3. Jedná se o souproudý příčně obtékaný trubkový výměník tvořen 97 jednohady o průměru trubky 33,7 mm a tloušťce trubky 3,6 mm. Spaliny se ochladí z 1170 °C na 995 °C a pára v přehříváku se ohřeje z 392 °C na 499 °C. Dalšími plochami jsou zde části závěsných trubek a membránové stěny.




*Obrázek 5: Schéma přehříváku P3*

## 7.1 Přehřívák P3

*Tabulka 6: Geometrie přehříváku P3*

| **Rozměry přehříváku P3** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{P3}$ | 33,7 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{P3}$ | 3,6 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{P3}$ | 26,5 | [mm] |
| Příčná rozteč | $s_1$ | 85 | [mm] |
| Podélná rozteč | $s_2$ | 180 | [mm] |
| Počet příčných řad | $z_1$ | 97 | [-] |
| Počet podélných řad | $z_2$ | 6 | [-] |

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B - n_{ZT} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ZT}^2}{4} - z_1 \cdot D_{P3} \cdot B \cdot 0{,}95 \tag{7.1}$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 340 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}0318^2}{4} - 97 \cdot 0{,}038 \cdot 4{,}408 \cdot 0{,}95 = 22{,}37\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{1170 + 995}{2} = 1082{,}5\ °C \tag{7.2}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{22{,}37} \cdot \frac{273{,}15 + 1082{,}5}{273{,}15} = 15{,}51\ m/s \tag{7.3}$$

### 7.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla pro uspořádání trubek za sebou**

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{7.4}$$

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot 0{,}96 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}118}{0{,}038} \cdot \left(\frac{15{,}51 \cdot 0{,}038}{1{,}95 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}58^{0{,}33}$$

$$\alpha_K = 94{,}87 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru**

$$C_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (6 - 2) = 0{,}96 \tag{7.5}$$

**Poměrná přímá rozteč**

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{85}{33{,}7} = 2{,}52 \tag{7.6}$$

**Poměrná podélná rozteč**

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{180}{33{,}7} = 5{,}34 \tag{7.7}$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

Korekční součinitel $C_s = 1$ pro $\sigma_2 \geq 2$.

### 7.1.2 Přestup tepla sáláním spalin

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{7.8}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}188 \cdot 1355{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{743{,}65}{1355{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{743{,}65}{1355{,}65}\right)} = 47{,}22\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$$a_{st} = 0{,}8$$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}209} = 0{,}188 \tag{7.9}$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 4{,}26 \cdot 0{,}39 \cdot 0{,}49 = 0{,}209 \tag{7.10}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}0337 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}085 \cdot 0{,}18}{0{,}0337^2} - 1\right) = 0{,}49\ m \tag{7.11}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{7.12}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0393 \cdot 0{,}49}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{1082{,}5 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S = 4{,}26$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{7.13}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\,min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\,min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{7.14}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{7.15}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \tag{7.16}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 445{,}5 + 25 + 273{,}15 = 743{,}65\ K \tag{7.17}$$

### 7.1.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 0{,}95 \cdot 94{,}87 + 47{,}23 = 137{,}36\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.18}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 137{,}36 = 116{,}75\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.19}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{778 - 496}{ln\frac{778}{496}} = 626{,}46\ °C \tag{7.20}$$

**Potřebná plocha přehříváku**

$$S_{P1} = \frac{Q_{P1}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{17836{,}014 \cdot 1000}{116{,}75 \cdot 626{,}46} = 243{,}86\ m^2 \tag{7.21}$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{1ř} = 0{,}94 \cdot B \cdot \pi \cdot D_{P3} \cdot z_1 = 0{,}94 \cdot 4{,}408 \cdot \pi \cdot 0{,}0337 \cdot 97 = 40{,}74\ m^2 \tag{7.22}$$

**Počet řad přehříváku**

$$n_{ř} = \frac{S_{P1}}{S_{1ř}} = \frac{243{,}86}{40{,}74} = 5{,}985\ \Rightarrow\ 6 \tag{7.23}$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{skut} = n_{ř} \cdot S_{1ř} = 6 \cdot 40{,}74 = 244{,}45\ m^2 \tag{7.24}$$

**Skutečný výkon přehříváku**

$$Q_{skut} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{skut} \cdot 0{,}001 = 116{,}75 \cdot 626{,}46 \cdot 244{,}45 \cdot 0{,}001 = 17879{,}23 \ kW \quad (7.25)$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{skut} - Q_{P1}}{Q_{skut}} \cdot 100 = \frac{17879{,}23 - 17836{,}014}{17879{,}23} \cdot 100 = 0{,}24\ \% \quad (7.26)$$

## 7.2 Závěsné trubky

*Tabulka 7: Geometrie závěsných trubek*

| **Rozměry závěsných trubek** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{ZT}$ | 31,8 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{ZT}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{ZT}$ | 23,8 | [mm] |
| Počet trubek | $n_{ZT}$ | 340 | [-] |
| Délka trubek | $l_{ZT}$ | 1,7 | [m] |

### 7.2.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}118}{0{,}05} \cdot \left(\frac{16{,}91 \cdot 0{,}05}{1{,}96 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}58^{0{,}4} \quad (7.27)$$

$$\alpha_K = 32{,}01 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 22{,}37}{1533{,}47} = 0{,}058\ m \quad (7.28)$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) + \pi \cdot n_{ZT} \cdot D_{ZT} + 2 \cdot (D_{P3} + 0{,}9 \cdot A) \cdot z_1 \quad (7.29)$$

$$O = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) + \pi \cdot 340 \cdot 0{,}0318 + 2 \cdot (0{,}038 + 0{,}9 \cdot 8{,}404) \cdot 97$$

$$O = 1533{,}47\ m$$

### 7.2.2 Přestup tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{7.30}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}189 \cdot 1355{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{629{,}175}{1355{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{629{,}175}{1355{,}65}\right)} = 42{,}13\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 331{,}025 + 25 + 273{,}15 = 629{,}175\ K \tag{7.31}$$

### 7.2.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 32{,}01 + 42{,}13 = 74{,}14\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.32}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 58{,}038 = 63{,}01\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.33}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{792{,}95 - 615}{ln\frac{792{,}95}{615}} = 899{,}92\ °C \tag{7.34}$$

**Plocha závěsných trubek**

$$S_{ZT3} = \pi \cdot D_{ZT} \cdot n_{ZT} \cdot h_{ZT} = \pi \cdot 0{,}0318 \cdot 340 \cdot 1{,}7 = 57{,}74\ m^2 \tag{7.35}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{ZT3} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{ZT3} \cdot 0{,}001 = 63{,}01 \cdot 899{,}92 \cdot 57{,}74 \cdot 0{,}001 = 2547{,}86\ kW \tag{7.36}$$

## 7.3 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí je u membránové stěny stejný jako u závěsných trubek.

$$\alpha_K = 32{,}01\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.37}$$

### 7.3.1 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{7.38}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}189 \cdot 1355{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{1355{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{1355{,}65}\right)} = 41{,}55\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \tag{7.39}$$

### 7.3.2 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 32{,}01\ + 41{,}55 = 73{,}56\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.40}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 73{,}56\ = 62{,}52\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{7.41}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{852{,}95 - 677{,}95}{ln\frac{852{,}95}{677{,}95}} = 762{,}1\ °C \tag{7.42}$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS} = 2 \cdot h_{ZT} \cdot (A+B) = 2 \cdot 1{,}7 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) = 43{,}56\ m^2 \tag{7.43}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS} \cdot 0{,}001 = 62{,}52\ \cdot 762{,}1 \cdot 43{,}56 \cdot 0{,}001 = 2075{,}62\ kW \tag{7.44}$$

### 7.3.3 Tepelná bilance oblasti přehříváku P3

**Celkový tepelný výkon v oblasti přehříváku P3**

$$Q_C = Q_{P3} + Q_{ZT3} + Q_{MS3} = 17879{,}23\ + 2547{,}86 + 2075{,}62 = 22459{,}62\ kW \qquad (7.45)$$

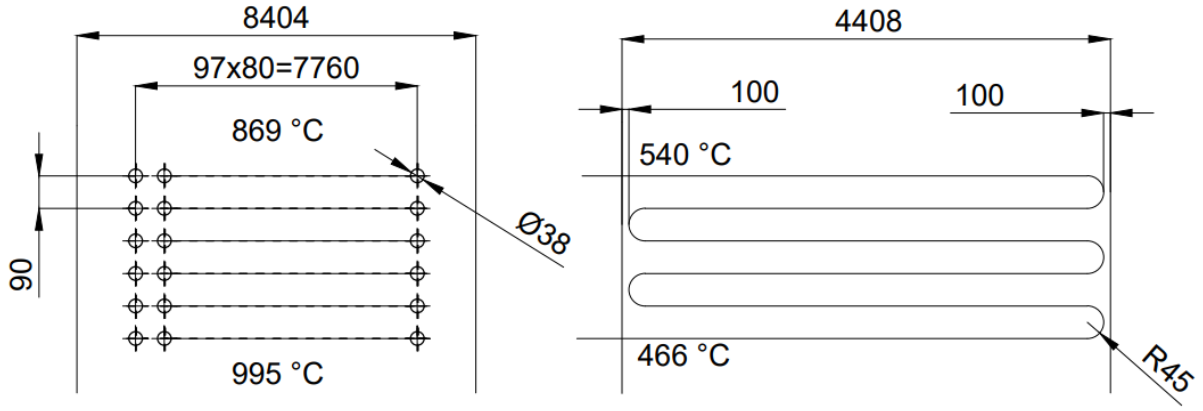
**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 5091{,}3\ - \frac{22459{,}62 \cdot 0{,}995}{22459{,}62} = 4254\ kJ/Nm^3 \qquad (7.46)$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 995 °C.

# 8 Oblast přehříváku P4

Hlavní teplosměnnou plochou, nacházející se v této oblasti, je přehřívák P4. Jedná se o souproudý příčně obtékaný trubkový výměník tvořen 97 jednohady o průměru trubky 38 mm a tloušťce trubky 5 mm. Spaliny se ochladí z 995 °C na 869 °C a pára v přehříváku se ohřeje z 466 °C na 540 °C. Odsud odchází pára o požadovaných parametrech. Dalšími plochami jsou zde části závěsných trubek a membránové stěny.




*Obrázek 6: Schéma přehříváku P4*

## 8.1 Přehřívák P4

*Tabulka 8: Geometrie přehříváku P4*

| **Rozměry přehříváku P4** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{P3}$ | 38 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{P3}$ | 5 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{P3}$ | 28 | [mm] |
| Příčná rozteč | $s_1$ | 80 | [mm] |
| Podélná rozteč | $s_2$ | 90 | [mm] |
| Počet příčných řad | $z_1$ | 97 | [-] |
| Počet podélných řad | $z_2$ | 6 | [-] |

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B - n_{ZT} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ZT}^2}{4} - z_1 \cdot D_{P4} \cdot B \cdot 0{,}95 \tag{8.1}$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 340 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}0318^2}{4} - 97 \cdot 0{,}038 \cdot 4{,}408 \cdot 0{,}95 = 20{,}53\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{995 + 869}{2} = 932\ °C \tag{8.2}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{20{,}52} \cdot \frac{273{,}15 + 1082{,}5}{273{,}15} = 15{,}03\ m/s \tag{8.3}$$

### 8.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla pro uspořádání trubek za sebou**

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{8.4}$$

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot 0{,}96 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}105}{0{,}038} \cdot \left(\frac{15{,}03 \cdot 0{,}038}{161 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}59^{0{,}33}$$

$$\alpha_K = 90{,}63\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru**

$$C_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (6 - 2) = 0{,}96 \tag{8.5}$$

**Poměrná přímá rozteč**

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{80}{38} = 2{,}105 \tag{8.6}$$

**Poměrná podélná rozteč**

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{90}{38} = 2{,}368 \tag{8.7}$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

Korekční součinitel $C_s = 1$ pro $\sigma_2 \geq 2$.

### 8.1.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{8.8}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}133 \cdot 1205{,}15^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{801{,}15}{1205{,}15}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{801{,}15}{1205{,}15}\right)} = 27{,}75 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$$a_{st} = 0{,}8$$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}144} = 0{,}135 \tag{8.9}$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 7{,}89 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}183 = 0{,}144 \tag{8.10}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}080 \cdot 0{,}09}{0{,}038^2} - 1\right) = 0{,}183 \ m \tag{8.11}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{8.12}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}039 \cdot 0{,}178}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{932 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 7{,}89$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{8.13}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\,min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\,min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{8.14}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{8.15}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393 \ Pa \tag{8.16}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 503 + 25 + 273{,}15 = 801{,}15\ K \tag{8.17}$$

### 8.1.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 0{,}95 \cdot 91{,}52 + 27{,}42 = 113{,}85\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.18}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 113{,}85 = 96{,}77\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.19}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{529 - 329}{ln\frac{529}{329}} = 859{,}78\ °C \tag{8.20}$$

**Potřebná plocha přehříváku**

$$S_{P4} = \frac{Q_{P4}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{11733{,}3312 \cdot 1000}{97{,}21 \cdot 859{,}78} = 287{,}93\ m^2 \tag{8.21}$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{1ř} = 0{,}94 \cdot B \cdot \pi \cdot D_{P4} \cdot z_1 = 0{,}94 \cdot 4{,}408 \cdot \pi \cdot 0{,}0337 \cdot 97 = 47{,}98\ m^2 \tag{8.22}$$

**Počet řad přehříváku**

$$n_ř = \frac{S_{P4}}{S_{1ř}} = \frac{287{,}93}{47{,}98} = 6{,}001\ \Rightarrow\ 6 \tag{8.23}$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{skut} = n_ř \cdot S_{1ř} = 6 \cdot 47{,}98 = 287{,}89\ m^2 \tag{8.24}$$

**Skutečný výkon přehříváku**

$$Q_{skut} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{skut} \cdot 0{,}001 = 97{,}21 \cdot 859{,}78 \cdot 287{,}89 \cdot 0{,}001 = 11731{,}73\ kW \tag{8.25}$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{skut} - Q_{P4}}{Q_{skut}} \cdot 100 = \frac{11731{,}73\ - 11733{,}3312}{11731{,}73} \cdot 100 = -0{,}014\ \% \tag{8.26}$$

## 8.2 Závěsné trubky

*Tabulka 9: Geometrie závěsných trubek*

| **Rozměry závěsných trubek** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{ZT}$ | 31,8 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{ZT}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{ZT}$ | 23,8 | [mm] |
| Počet trubek | $n_{ZT}$ | 340 | [-] |
| Délka trubek | $l_{ZT}$ | 1,4 | [m] |

### 8.2.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}105}{0{,}05} \cdot \left(\frac{15{,}03 \cdot 0{,}05}{1{,}6 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}59^{0{,}4} \qquad (8.27)$$

$$\alpha_K = 33{,}32 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 20{,}53}{1535{,}03} = 0{,}05 \ m \qquad (8.28)$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) + \pi \cdot n_{ZT} \cdot D_{ZT} + 2 \cdot (D_{P3} + 0{,}9 \cdot A) \cdot z_1 \qquad (8.29)$$

$$O = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) + \pi \cdot 340 \cdot 0{,}0321 + 2 \cdot (0{,}038 + 0{,}9 \cdot 8{,}404) \cdot 97$$

$$O = 1534{,}3 \ m$$

### 8.2.2 Přestup tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \qquad (8.30)$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}133 \cdot 1205{,}15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{629{,}18}{1205{,}15}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{629{,}18}{1205{,}15}\right)} = 22{,}84 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 331{,}03 + 25 + 273{,}15 = 629{,}175\ K \tag{8.31}$$

### 8.2.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 33{,}32 + 22{,}84 = 56{,}16\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.32}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 56{,}16 = 47{,}74\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.33}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{643 - 535}{ln\frac{643}{535}} = 587{,}35\ °C \tag{8.34}$$

**Plocha závěsných trubek**

$$S_{ZT4} = \pi \cdot D_{ZT} \cdot n_{ZT} \cdot h_{ZT} = \pi \cdot 0{,}032 \cdot 340 \cdot 1{,}4 = 47{,}55\ m^2 \tag{8.35}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{ZT4} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{ZT4} \cdot 0{,}001 = 47{,}52 \cdot 587{,}35 \cdot 47{,}55 \cdot 0{,}001 = 1333{,}29\ kW \tag{8.36}$$

## 8.3 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí je u membránové stěny stejný jako u závěsných trubek.

$$\alpha_K = 33{,}32\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.37}$$

### 8.3.1 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{8.38}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}133 \cdot 1205{,}15^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{801{,}15}{1205{,}15}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{801{,}15}{1205{,}15}\right)} = 22{,}48\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \tag{8.39}$$

### 8.3.2 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 33{,}34\ + 22{,}21 = 55{,}80\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.40}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 55{,}80 = 47{,}43\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{8.41}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{995-869}{ln\frac{995}{869}} = 612{,}79\ °C \tag{8.42}$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS4} = 2 \cdot h_{ZT} \cdot (A+B) = 2 \cdot 1{,}8 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) = 46{,}12\ m^2 \tag{8.43}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS4} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS4} \cdot 0{,}001 = 49{,}35\ \cdot 762{,}1 \cdot 43{,}56 \cdot 0{,}001 = 1340{,}65\ kW \tag{8.44}$$

## 8.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P4

**Celkový tepelný výkon v oblasti přehříváku P4**

$$Q_C = Q_{P4} + Q_{ZT4} + Q_{MS4} = 11731{,}73\ + 1333{,}29 + 1340{,}64 = 14405{,}66\ kW \tag{8.45}$$

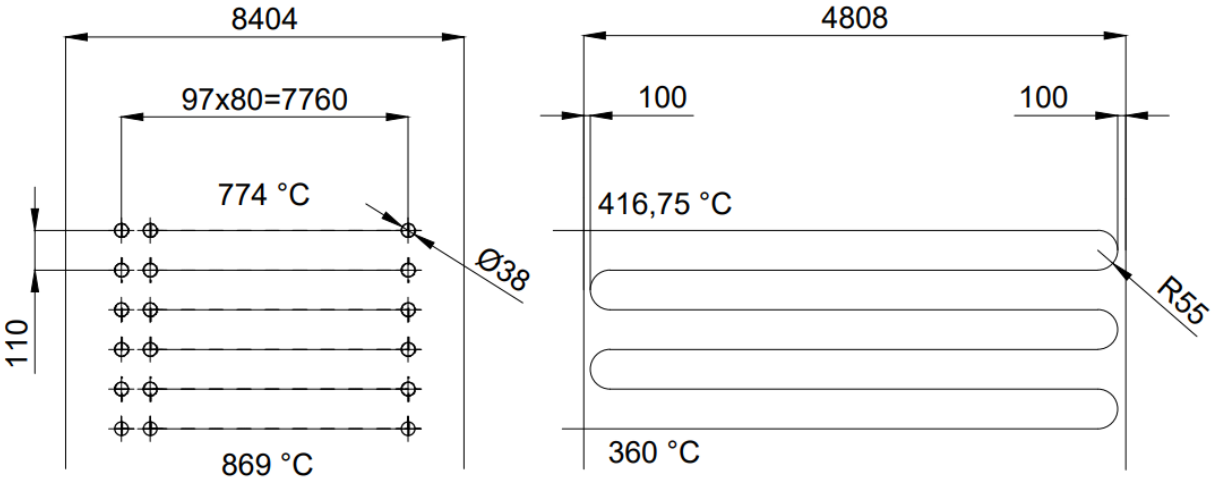
**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 4259{,}14 - \frac{14405{,}66 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 3702{,}18\ kJ/Nm^3 \tag{8.46}$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 869 °C.

# 9 Oblast přehříváku P2

Hlavní teplosměnnou plochou, nacházející se v této oblasti, je přehřívák P2. Jedná se o souproudý, příčně obtékaný trubkový výměník tvořen 97 jednohady o průměru trubky 38 mm a tloušťce trubky 5 mm. Spaliny se ochladí z 869 °C na 774 °C a pára v přehříváku se ohřeje z 360 °C na 416,75 °C. Dalšími plochami jsou zde části závěsných trubek a membránové stěny.




*Obrázek 7: Schéma přehříváku P2*

## 9.1 Přehřívák P2

*Tabulka 10: Geometrie přehříváku P2*

| **Rozměry přehříváku P2** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{P2}$ | 38 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{P2}$ | 5 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{P2}$ | 28 | [mm] |
| Příčná rozteč | $s_1$ | 80 | [mm] |
| Podélná rozteč | $s_2$ | 110 | [mm] |
| Počet příčných řad | $z_1$ | 97 | [-] |
| Počet podélných řad | $z_2$ | 6 | [-] |

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B - n_{ZT} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ZT}^2}{4} - z_1 \cdot D_{P3} \cdot B \cdot 0{,}95 \tag{9.1}$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 340 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}0321^2}{4} - 97 \cdot 0{,}038 \cdot 4{,}408 \cdot 0{,}95 = 20{,}53\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{869 + 774}{2} = 821{,}5\ °C \tag{9.2}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{20{,}53} \cdot \frac{273{,}15 + 821{,}5}{273{,}15} = 13{,}65\ m/s \tag{9.3}$$

### 9.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla pro uspořádání trubek za sebou**

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{9.4}$$

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot 0{,}96 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}095}{0{,}038} \cdot \left(\frac{13{,}65 \cdot 0{,}038}{1{,}37 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}605^{0{,}33}$$

$$\alpha_K = 85{,}87\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru**

$$C_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (6 - 2) = 0{,}96 \tag{9.5}$$

**Poměrná přímá rozteč**

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{80}{38} = 2{,}105 \tag{9.6}$$

**Poměrná podélná rozteč**

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{110}{38} = 2{,}89 \tag{9.7}$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

Korekční součinitel $C_s = 1$ pro $\sigma_2 \geq 2$.

### 9.1.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{9.8}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}159 \cdot 1094{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{686{,}252}{1094{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{686{,}252}{1094{,}65}\right)} = 23{,}43 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$a_{st} = 0{,}8$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}174} = 0{,}159 \tag{9.9}$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 7{,}52 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}231 = 0{,}174 \tag{9.10}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}080 \cdot 0{,}11}{0{,}038^2} - 1\right) = 0{,}231 \ m \tag{9.11}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{9.12}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}039 \cdot 0{,}231}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{821{,}5 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 7{,}52$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{9.13}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\,min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\,min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{9.14}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{9.15}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393 \ Pa \tag{9.16}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 388{,}375 + 25 + 273{,}15 = 686{,}525\ K \tag{9.17}$$

### 9.1.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 0{,}95 \cdot 85{,}87 + 23{,}43 = 105{,}00\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.18}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 105{,}00\ = 89{,}25\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.19}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{509 - 357{,}25}{ln\frac{509}{357{,}25}} = 428{,}68\ °C \tag{9.20}$$

**Potřebná plocha přehříváku**

$$S_{P2} = \frac{Q_{P2}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{11020{,}6908 \cdot 1000}{89{,}25 \cdot 428{,}68} = 288{,}06\ m^2 \tag{9.21}$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{1ř} = 0{,}94 \cdot B \cdot \pi \cdot D_{P2} \cdot z_1 = 0{,}94 \cdot 4{,}408 \cdot \pi \cdot 0{,}0337 \cdot 97 = 47{,}98\ m^2 \tag{9.22}$$

**Počet řad přehříváku**

$$n_{ř} = \frac{S_{P2}}{S_{1ř}} = \frac{288{,}06}{47{,}98} = 6{,}001\ \Rightarrow\ 6 \tag{9.23}$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{skut} = n_{ř} \cdot S_{1ř} = 6 \cdot 47{,}98 = 287{,}89\ m^2 \tag{9.24}$$

**Skutečný výkon přehříváku**

$$Q_{skut} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{skut} \cdot 0{,}001 = 89{,}997\ \cdot 428{,}68 \cdot 287{,}89 \cdot 0{,}001 = 11013{,}99\ kW \tag{9.25}$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{skut} - Q_{P4}}{Q_{skut}} \cdot 100 = \frac{11013{,}99 - 11020{,}6908}{11013{,}99} \cdot 100 = 0{,}06\ \% \tag{9.26}$$

## 9.2 Závěsné trubky

*Tabulka 11: Geometrie závěsných trubek*

| **Rozměry závěsných trubek** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{ZT}$ | 32 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{ZT}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{ZT}$ | 24 | [mm] |
| Počet trubek | $n_{ZT}$ | 340 | [-] |
| Délka trubek | $l_{ZT}$ | 0,75 | [m] |

### 9.2.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}95}{0{,}054} \cdot \left(\frac{13{,}65 \cdot 0{,}054}{1{,}38 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}605^{0{,}4} \quad (9.27)$$

$$\alpha_K = 31{,}79 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 20{,}53}{1535{,}03} = 0{,}054 \ m \quad (9.28)$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) + \pi \cdot n_{ZT} \cdot D_{ZT} + 2 \cdot (D_{P2} + 0{,}9 \cdot A) \cdot z_1 \quad (9.29)$$

$$O = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) + \pi \cdot 340 \cdot 0{,}0321 + 2 \cdot (0{,}038 + 0{,}9 \cdot 8{,}404) \cdot 97$$

$$O = 1511{,}08 \ m$$

### 9.2.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (9.30)$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}159 \cdot 1094{,}65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{629{,}175}{1094{,}65}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{629{,}175}{1094{,}65}\right)} = 20{,}153 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 331{,}025 + 25 + 273{,}15 = 629{,}175\ K \tag{9.31}$$

### 9.2.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 31{,}79 + 20{,}53 = 53{,}59\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.32}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 53{,}59 = 45{,}56\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.33}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{551{,}95 - 415}{ln\frac{551{,}95}{415}} = 480{,}22\ °C \tag{9.34}$$

**Plocha závěsných trubek**

$$S_{ZT2} = \pi \cdot D_{ZT} \cdot n_{ZT} \cdot h_{ZT2} = \pi \cdot 0{,}032 \cdot 344 \cdot 0{,}75 = 25{,}48\ m^2 \tag{9.35}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{ZT2} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{ZT2} \cdot 0{,}001 = 44{,}12 \cdot 480{,}22 \cdot 25{,}48 \cdot 0{,}001 = 557{,}34\ kW \tag{9.36}$$

## 9.3 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí je u membránové stěny stejný jako u závěsných trubek.

$$\alpha_K = 31{,}79\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 9.3.1 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{9.37}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}159 \cdot 1094{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{1094{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{1094{,}65}\right)} = 21{,}43\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \tag{9.38}$$

### 9.3.2 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 31{,}79\ + 21{,}43 = 53{,}22\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.39}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 53{,}22 = 45{,}24\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{9.40}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{551{,}95 - 456{,}95}{ln\frac{551{,}95}{456{,}95}} = 502{,}96\ °C \tag{9.41}$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS2} = 2 \cdot h_{ZT2} \cdot (A + B) = 2 \cdot 0{,}75 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) = 19{,}22\ m^2 \tag{9.42}$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS4} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS4} \cdot 0{,}001 = 43{,}83\ \cdot 502{,}96 \cdot 26{,}02 \cdot 0{,}001 = 437{,}26\ kW \tag{9.43}$$

## 9.4 Tepelná bilance oblasti přehříváku P2

**Celkový tepelný výkon v oblasti přehříváku P2**

$$Q_C = Q_{P2} + Q_{ZT2} + Q_{MS2} = 11013{,}99\ + 557{,}34 + 437{,}26\ = 12008{,}59\ kW \tag{9.44}$$

**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 3701{,}5 - \frac{12008{,}59 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 3237{,}2\ kJ/Nm^3 \tag{9.45}$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 774 °C.

# 10 Obratová komora

Obratová komora je rozdělena na dvě části, kde dělicí rovinou je výparníková mříž. Obratová komora je tvořena membránovou stěnou a závěsnými trubkami.

## 10.1 Závěsné trubky

*Tabulka 12: Geometrie obratové komory*

| **Rozměry obratové komory** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{ZT}$ | 31,8 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_{ZT}$ | 4 | [mm] |
| Vnitřní průměr trubky | $d_{ZT}$ | 24 | [mm] |
| Počet trubek | $n_{ZT}$ | 340 | [-] |
| Délka trubek | $l_{ZT}$ | 2,5 | [m] |

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B - n_{ZT} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ZT}^2}{4} - z_1 \cdot D_{P3} \cdot B \cdot 0{,}95 \tag{10.1}$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 340 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}0318^2}{4} = 36{,}77\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{774 + 741}{2} = 757{,}5\ °C \tag{10.2}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{36{,}77} \cdot \frac{273{,}15 + 757{,}5}{273{,}15} = 7{,}17\ m/s \tag{10.3}$$

### 10.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}089}{2{,}47} \cdot \left(\frac{7{,}17 \cdot 2{,}47}{1{,}24 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}61^{0{,}4} \tag{10.4}$$

$$\alpha_K = 9{,}08\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 36{,}77}{59{,}59} = 2{,}47\ m \tag{10.5}$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) + \pi \cdot n_{ZT} \cdot D_{ZT} = O = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) + \pi \cdot 340 \cdot 0{,}0318 \quad (10.6)$$

$$O = 59{,}59\ m$$

### 10.1.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (10.7)$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}459 \cdot 1030{,}65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{629{,}175}{1030{,}65}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{629{,}175}{1030{,}65}\right)} = 55{,}03\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$$a_{st} = 0{,}8$$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}61} = 0{,}459 \quad (10.8)$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 1{,}92 \cdot 0{,}1 \cdot 3{,}21 = 0{,}615 \quad (10.9)$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{71{,}38}{80{,}09} = 3{,}21\ m \quad (10.10)$$

**Objem komory**

$$V = A \cdot B \cdot h_{ZT} - \pi \cdot \frac{D_{ZT}^2}{4} \cdot h_{ZT} = 8{,}404 \cdot 4{,}408 \cdot 2{,}5 - \pi \cdot \frac{0{,}0318^2}{4} \cdot 2{,}5 = 71{,}38\ m^3 \quad (10.11)$$

**Povrch sálajícího prostoru**

$$F_{st} = 2 \cdot B \cdot h_{ZT} + A \cdot h_{ZT} + A \cdot B = 2 \cdot 8{,}404 \cdot 2{,}5 + 4{,}408 \cdot 2{,}5 + 8{,}404 \cdot 4{,}408 \quad (10.12)$$

$$F_{st} = 80{,}09\ m^2$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{10.13}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}039 \cdot 3{,}21}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{757{,}5 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 1{,}92$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{10.14}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\,min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\,min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{10.15}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{10.16}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \tag{10.17}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 331{,}25 + 25 + 273{,}15 = 629{,}175\ K \tag{10.18}$$

### 10.1.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 9{,}08\ + 54{,}93 = 64{,}09\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{10.19}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 64{,}09 = 54{,}48\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{10.20}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{457 - 369}{ln\frac{457}{369}} = 425{,}77\ °C \tag{10.21}$$

**Plocha závěsných trubek**

$$S_{ZT} = \pi \cdot D_{ZT} \cdot n_{ZT} \cdot h_{ZT} = \pi \cdot 0{,}0318 \cdot 340 \cdot 2{,}5 = 84{,}92\ m^2 \quad (10.22)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{ZT4} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{ZT} \cdot 0{,}001 = 54{,}48 \cdot 425{,}77 \cdot 84{,}92 \cdot 0{,}001 = 1969{,}7\ kW \quad (10.23)$$

## 10.2 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí je u membránové stěny stejný jako u závěsných trubek.

$$\alpha_K = 9{,}06\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 10.2.1 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \quad (10.24)$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}459 \cdot 1030{,}65^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{1030{,}65}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{629{,}175}\right)} = 54{,}09\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \quad (10.25)$$

### 10.2.2 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 9{,}06 + 54{,}09 = 63{,}08\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10.26)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 63{,}08 = 53{,}62\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10.27)$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{456{,}95 - 423{,}95}{ln\frac{456{,}95}{423{,}95}} = 440{,}24\ °C \quad (10.28)$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS} = 2 \cdot h_{ZT} \cdot B + h_{ZT} \cdot A + A \cdot B = 2 \cdot 2{,}5 \cdot 4{,}408 + 2{,}5 \cdot 8{,}404 + 8{,}404 \cdot 4{,}408$$

$$S_{MS} = 80{,}09\ m^2 \quad (10.29)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS} \cdot 0{,}001 = 53{,}62 \cdot 440{,}24 \cdot 80{,}09 \cdot 0{,}001 = 1890{,}72\ kW \quad (10.30)$$

## 10.3 Celková bilance oblasti obratové komory 1. tahu

**Celkový tepelný výkon obratové komory 1. tahu**

$$Q_C = Q_{ZT} + Q_{MS} = 1969{,}71 + 1890{,}72 = 3860{,}43\ kW \quad (10.31)$$

**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 3236{,}9 - \frac{3860{,}43 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 3086{,}22\ kJ/Nm^3 \quad (10.32)$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 741 °C.

## 10.4 Výparníková mříž

Výparníková mříž je další díl výparníku. Nachází se na pomezí prvního a druhého tahu. Jedná se o rozvolněnou membránovou stěnu.

*Tabulka 13: Geometrie výparníkové mříže*

| **Rozměry výparníkové mříže** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_{VM}$ | 0,0603 | [m] |
| Výška mříže | $H_{VM}$ | 2,5 | [m] |
| Šířka mříže | A | 8,404 | [m] |
| Příčná rozteč | $s_1$ | 0,238 | [m] |
| Podélná rozteč | $s_2$ | 0,1 | [m] |
| Počet trubek příčně | $z_1$ | 35 | [-] |
| Počet trubek podélně | $z_2$ | 3 | [-] |

**Světlý průřez**

$$F_S = C \cdot (A - z_1 \cdot D_{VM}) = 2{,}5 \cdot (8{,}404 - 35 \cdot 0{,}0603) = 15{,}73\ m^2 \quad (10.33)$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{741 + 725}{2} = 733\ °C \quad (10.34)$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{15{,}73} \cdot \frac{273{,}15 + 733}{273{,}15} = 16{,}37\ m/s \tag{10.35}$$

### 10.4.1 Přestup tepla konvekcí

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{10.36}$$

$$\alpha_K = 0{,}2 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}95 \cdot \frac{0{,}08}{0{,}0603} \cdot \left(\frac{16{,}37 \cdot 0{,}0603}{1{,}1 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}617^{0{,}33}$$

$$\alpha_K = 76{,}34\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru**

$$C_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (3 - 2) = 0{,}92 \tag{10.37}$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} \tag{10.38}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 3{,}95 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1{,}66}{2}\right)^3\right]^2} = 0{,}95$$

**Poměrná přímá rozteč**

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{238}{60{,}3} = 3{,}95 \tag{10.39}$$

**Poměrná podélná rozteč**

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{100}{60{,}3} = 1{,}66 \tag{10.40}$$

### 10.4.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{10.41}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}21 \cdot 1006{,}15^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{1006{,}15}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{1006{,}15}\right)} = 23{,}66\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$$a_{st} = 0{,}8$$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}238} = 0{,}21 \tag{10.42}$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 5{,}98 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}398 = 0{,}238 \tag{10.43}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}238 \cdot 0{,}1}{0{,}0603^2} - 1\right) = 0{,}398\ m \tag{10.44}$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \tag{10.45}$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}039 \cdot 0{,}398}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{733 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 5{,}985$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \tag{10.46}$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\ min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\ min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \tag{10.47}$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \tag{10.48}$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \tag{10.49}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \tag{10.50}$$

### 10.4.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 76{,}33\ + 23{,}66 = 99{,}99\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{10.51}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 99{,}99 = 84{,}99\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{10.52}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{423{,}95 - 407{,}95}{ln\frac{423{,}95}{407{,}95}} = 415{,}9\ °C \tag{10.53}$$

**Plocha výparníkové mříže**

$$S_{VM} = \pi \cdot D \cdot h_{VM} \cdot (z_1 \cdot z_2 + 1) = \pi \cdot 0{,}0603 \cdot 2{,}5 \cdot (35 \cdot 3 + 1) = 50{,}2\ m^2 \tag{10.54}$$

**Výkon výparníkové mříže**

$$Q_{VM} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{VM} \cdot 0{,}001 = 84{,}99\ \cdot 415{,}9 \cdot 80{,}09 \cdot 50{,}2 = 1774{,}54\ kW \tag{10.55}$$

### 10.4.4 Celková bilance výparníkové mříže

**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 3086{,}22\ - \frac{1774{,}54 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 3017{,}61\ kJ/Nm^3 \tag{10.56}$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 725 °C.

## 10.5 Membránová stěna 2. tah

**Světlý průřez**

$$F_S = A \cdot B \tag{10.57}$$

$$F_S = 8{,}404 \cdot 4{,}408 = 37{,}04\ m^2$$

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{725 + 7131}{2} = 719\ °C \tag{10.58}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{37{,}04} \cdot \frac{273{,}15 + 719}{273{,}15} = 6{,}85\ m/s \tag{10.59}$$

### 10.5.1 Přestup tepla konvekcí

**Součinitel přestupu tepla při podélném proudění**

$$\alpha_K = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}085}{5{,}78} \cdot \left(\frac{6{,}85 \cdot 5{,}78}{1{,}2 \cdot 10^{-4}}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}62^{0{,}4} \tag{10.60}$$

$$\alpha_K = 7{,}35\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O} = \frac{4 \cdot 37{,}04}{25{,}62} = 2{,}44\ m \tag{10.61}$$

**Obvod průřezu kanálu**

$$O = 2 \cdot (A + B) = 2 \cdot (8{,}404 + 4{,}408) = 25{,}62\ m \tag{10.62}$$

### 10.5.2 Přestup tepla sáláním

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)} \tag{10.63}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}445 \cdot 992{,}15^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{615{,}2}{992{,}15}\right)^{3{,}6}}{1-\left(\frac{615{,}2}{992{,}15}\right)} = 48{,}18\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

$a_{st} = 0{,}8$

**Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu $T_s$**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0{,}588} = 0{,}445 \qquad (10.64)$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = k_S \cdot r_S \cdot p \cdot s = 2{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 2{,}76 = 0{,}588 \qquad (10.65)$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem bez trubkového svazku**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{92{,}61}{37{,}04} = 2{,}75\ m \qquad (10.66)$$

**Objem komory**

$$V = A \cdot B \cdot h_{ZT} = 8{,}404 \cdot 4{,}408 \cdot 2{,}5 = 92{,}61\ m^3 \qquad (10.67)$$

**Povrch sálajícího prostoru**

$$F_{st} = 2 \cdot B \cdot h_{ZT} + A \cdot h_{ZT} + A \cdot B = 2 \cdot 8{,}404 \cdot 2{,}5 + 4{,}408 \cdot 2{,}5 + 8{,}404 \cdot 4{,}408 \qquad (10.68)$$

$F_{st} = 80{,}09\ m^2$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3{,}16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{t_s + 273{,}15}{1000}\right) \cdot r_S \qquad (10.69)$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}137}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}039 \cdot 2{,}75}} - 1{,}02\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{719 + 273{,}15}{1000}\right) \cdot 0{,}393 = 2{,}14$$

**Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0{,}372}{2{,}716} = 0{,}137 \qquad (10.70)$$

**Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV\,min} + (\alpha_S - 1) \cdot O_{VV\,min}} = \frac{0{,}461}{1{,}56 + (1{,}15 - 1) \cdot 1{,}61} = 0{,}256 \quad (10.71)$$

**Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0{,}137 + 0{,}256 = 0{,}393 \quad (10.72)$$

**Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_S = r_S \cdot p = 0{,}393 \cdot 0{,}1 = 0{,}0393\ Pa \quad (10.73)$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny**

$$T_Z = t + \Delta t + 273{,}15 = 317{,}05 + 25 + 273{,}15 = 615{,}2\ K \quad (10.74)$$

### 10.5.3 Prostup tepla

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_S = \omega \cdot \alpha_K + \alpha_{sal} = 1 \cdot 7{,}35 + 48{,}18 = 55{,}53\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10.75)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \alpha_S = 0{,}85 \cdot 55{,}53 = 47{,}21\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10.76)$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{407{,}95 - 395{,}95}{ln\frac{407{,}95}{395{,}95}} = 401{,}92\ °C \quad (10.77)$$

**Plocha membránové stěny**

$$S_{MS} = 2 \cdot h_{ZT} \cdot B + h_{ZT} \cdot A + A \cdot B = 2 \cdot 2{,}5 \cdot 4{,}408 + 2{,}5 \cdot 8{,}404 + 8{,}404 \cdot 4{,}408$$

$$S_{MS} = 80{,}09\ m^2 \quad (10.78)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{MS} = k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{MS} \cdot 0{,}001 = 47{,}21 \cdot 401{,}92 \cdot 80{,}09 \cdot 0{,}001 = 1519{,}64\ kW \quad (10.79)$$

### 10.5.4 Celková bilance obratové komory 2. tah

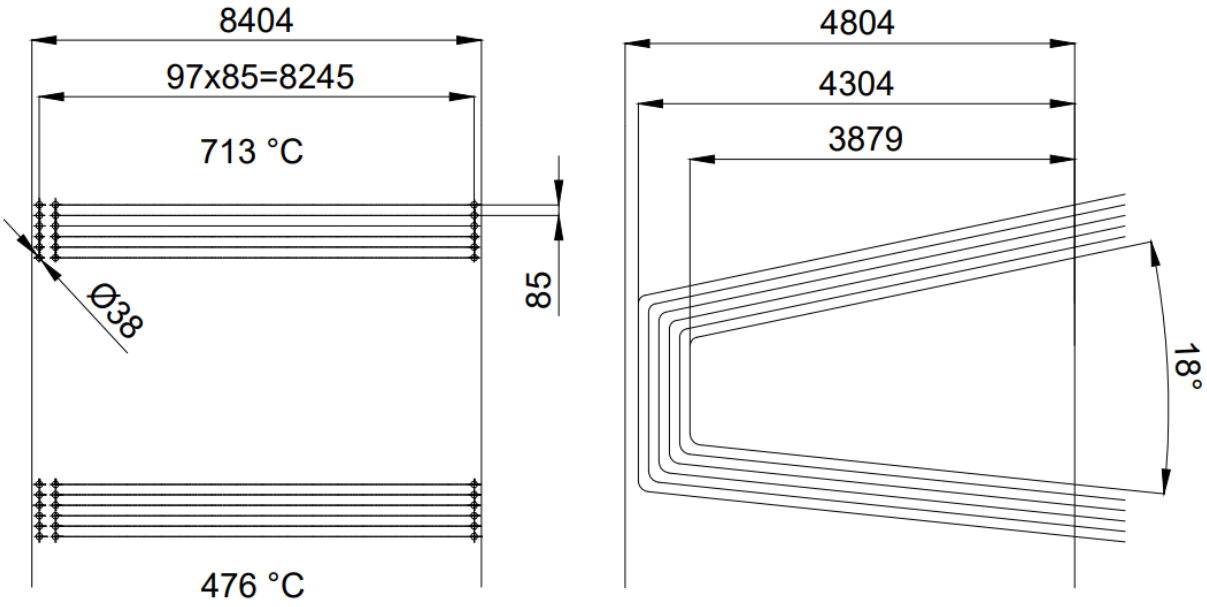
**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_C \cdot h}{m_{pal}} = 3017{,}61 \ - \frac{1519{,}64 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 2955\ kJ/Nm^3 \qquad (10.80)$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 713 °C.

# 11 Výparník

Celkový výkon výparníku je dán výkonem membránové stěny, výparníkové mříže a konvekčního výparníku, který je přidán kvůli nedostačujícímu výkonu membránové stěny a výparníkové mříže. Jedná se o žebrované trubky s průměrem 38 mm (bez žebra) a tloušťkou 3,6 mm. Přirozená cirkulace je zajištěna sklonem 9°. Dojde k ochlazení spalin z 713 °C na 476 °C.




*Obrázek 8: Schéma konvekčního výparníku*

## 11.1 Konvekční výparník

*Tabulka 14: Geometrie konvekčního výparníku*

| **Rozměry konvekčního výparníku** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | $D_V$ | 38 | [mm] |
| Tloušťka trubky | $t_V$ | 3,6 | [mm] |
| Příčná rozteč | s1 | 85 | [mm] |
| Podélná rozteč | s2 | 85 | [mm] |
| Počet příčných řad | z1 | 98 | [mm] |
| Počet podélných řad | z2 | 6 | [-] |
| Průměr s žebrem | Dž | 56 | [-] |
| Výška žebra | hž | 9 | [mm] |
| Tloušťka žebra | tž | 1 | [mm] |
| Počet žeber | nž | 200 | [1/m] |
| Rozteč žeber | sž | 5 | [mm] |

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\,in} + t_{SP\,out}}{2} = \frac{713 + 476}{2} = 594{,}5\ °C \tag{11.1}$$

**Průřez trubek**

$$S_{tr} = D + ((D_ž - D) \cdot t_ž \cdot h_ž) \cdot z_1 + 1) \cdot b \tag{11.2}$$

$$S_{tr} = 0{,}038 + (0{,}056 - 0{,}038) \cdot 0{,}001 \cdot 0{,}009) \cdot 98 + 1) \cdot 4{,}408 = 16{,}58\ m^2$$

**Světlý průřez**

$$F_S = b \cdot c - S_{tr} = 8{,}404 \cdot 4{,}408 - 16{,}58 = 20{,}46\ m^2 \tag{11.3}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{20{,}46} \cdot \frac{273{,}15 + 594{,}5}{273{,}15} = 10{,}85\ m/s \tag{11.4}$$

### 11.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{1r} = \left[\frac{S_ž}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right] \cdot \frac{\psi_ž \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_ž \cdot \alpha_k} = [0{,}848 \cdot 0{,}93 \cdot 1 + 0{,}152] \cdot \frac{0{,}85 \cdot 47{,}39}{1 + 0 \cdot 0{,}85 \cdot 47{,}39}$$

$$\alpha_{1r} = 37{,}87\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{11.5}$$

**Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin (kruhová žebra)**

$$\frac{S_ž}{S} = \frac{\left(\frac{D_ž}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_ž}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot (\frac{S_ž}{D} - \frac{t_ž}{D})} = \frac{\left(\frac{0{,}056}{0{,}038}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0{,}056}{0{,}038}\right)^2 - 1 + 2 \cdot (\frac{0{,}005}{0{,}038} - \frac{0{,}001}{0{,}038})} = 0{,}848 \tag{11.6}$$

**Podíl volných částí trubky (bez žeber) a celkové plochy na straně spalin**

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_ž}{S} = 0{,}152 \tag{11.7}$$

**Součinitel β**

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_ž \cdot \alpha_k}{t_ž \cdot \lambda_ž \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_ž \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}85 \cdot 47{,}37}{0{,}001 \cdot 40 \cdot (1 + 0 \cdot 0{,}85 \cdot 47{,}37)}} = 44{,}87 \tag{11.8}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro žebrované trubky (kruhové) uspořádané za sebou**

$$\alpha_k = 0{,}105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{s_{\check{z}}} \cdot \left(\frac{D}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{h_{\check{z}}}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{w \cdot s_{\check{z}}}{\nu}\right)^{0{,}72} \quad (11.9)$$

$$\alpha_k = 0{,}105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}074}{0{,}005} \cdot \left(\frac{0{,}038}{0{,}005}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{0{,}009}{0{,}005}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{10{,}85 \cdot 0{,}005}{6{,}41 \cdot 10^{-5}}\right)^{0{,}72}$$

$$\alpha_k = 47{,}37 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Součinitel efektivnosti žebra E se odečte z grafu. Určuje se ze závislosti $\beta \cdot h_{\check{z}}$ *a* $D_{\check{z}}/D$.

Opravný koeficient $C_z = 1$ pro $z_1 \geq 4$.

Opravný koeficient $C_s = 1$ pro $s_2/D > 2$.

Koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení $\alpha_k$ po povrchu žebra $\psi_{\check{z}} = 0{,}85$.

Součinitel rozšíření žebra $\mu = 1$ pro konstantní tloušťku žebra.

### 11.1.2 Prostup tepla

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha_{1r} = 37{,}87 \ \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (11.10)$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{395{,}95 - 158{,}95}{ln \frac{395{,}95}{158{,}95}} = 259{,}67 \ °C \quad (11.11)$$

**Potřebný výkon konvekčního výparníku**

$$Q_{KV} = Q_V - Q_{MS1} - Q_{MS3} - Q_{MS4} - Q_{MS2} - Q_{MS1T} - Q_{VM} - Q_{MS2T} - Q_O + Q_N \quad (11.12)$$

$$Q_{KV} = 69905{,}41 - 2528{,}96 - 2075{,}62 - 1340{,}65 - 437{,}26 - 1890{,}72 - 1774{,}54 \\ -1522{,}35 - 32662{,}88 + 1196{,}8$$

$$Q_{KV} = 27053{,}1 \ kW$$

**Potřebná plocha konvekčního výparníku**

$$S_{KV} = \frac{Q_{KV} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{27053{,}1 \cdot 1000}{37{,}87 \cdot 259{,}67} = 2750{,}8\ m^2 \quad (11.13)$$

**Plocha jednoho metru trubky**

$$S_{1m} = \pi \cdot D - \pi \cdot D \cdot n_{ž} \cdot t_{ž} + \pi \cdot \frac{D_{ž}^2 - D^2}{4} \cdot 2 \cdot n_{ž} + \pi \cdot D_{ž} \cdot n_{ž} \cdot t_{ž} \quad (11.14)$$

$$S_{1m} = \pi \cdot 0{,}038 - \pi \cdot 0{,}038 \cdot 200 \cdot 0{,}001 + \pi \cdot \frac{0{,}056^2 - 0{,}038^2}{4} \cdot 2 \cdot 90 + \pi \cdot 0{,}056 \cdot 200 \cdot 0{,}001$$

$$S_{1m} = 0{,}651\ m^2$$

**Potřebná délka trubek**

$$l = \frac{S_{KV}}{S_{1m}} = \frac{2750{,}8}{0{,}651} = 4225{,}91\ m \quad (11.15)$$

**Potřebná délka 1 trubky**

$$l_{1T} = \frac{S}{z_1 \cdot z_2} = \frac{4197{,}13}{98 \cdot 6} = 7{,}1869\ m \quad (11.16)$$

**Skutečná délka 1 trubky**

$$l_{1T\ skut} = 7{,}19\ m \quad (11.17)$$

**Skutečná délka trubek**

$$l_{skut} = l_{1T\ skut} \cdot z_1 \cdot z_2 = 7{,}19 \cdot 98 \cdot 6 = 4227{,}72\ m \quad (11.18)$$

**Skutečná plocha trubek**

$$S_{KV\ skut} = S_{1m} \cdot l_{skut} = 0{,}651 \cdot 4227{,}72 = 2751{,}98\ m^2 \quad (11.19)$$

**Skutečný výkon**

$$Q_{KV\ skut} = \frac{k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{KV\ skut}}{1000} = \frac{37{,}87 \cdot 259{,}67 \cdot 2751{,}98}{1000} = 27065{,}09\ kW \quad (11.20)$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{KV\ skut} - Q_{KV}}{Q_{KV\ skut}} \cdot 100 = \frac{27065{,}09\ - 27053{,}1}{27065{,}09} \cdot 100 = 0{,}05\ \% \quad (11.21)$$

### 11.1.3 Tepelná bilance konvekčního výparníku

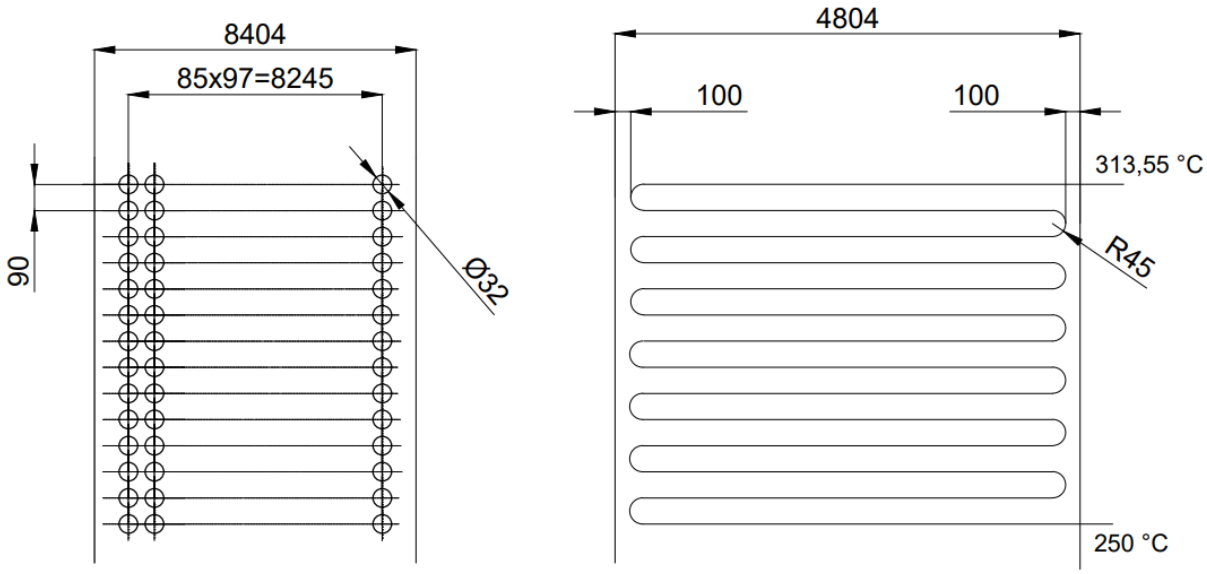
**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_{KV} \cdot h}{m_{pal}} = 2955 \ - \frac{26999{,}8 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 1911\ kJ/Nm^3 \qquad (11.22)$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 476 °C.

# 12 Ekonomizér

Ekonomizér je rozdělen na 2 části. Výstupní část se nachází za konvekčním výparníkem na konci druhého tahu a vstupní část je jedinou teplosměnnou plochou ve třetím tahu. Obratová komora do třetího tahu je oplechována a nepředává teplo médiu. Druhá část ekonomizéru (teplejší) je řešena jako žebrovaný výměník s 97 jednohady, průměrem trubky 32 mm (bez žebra) a tloušťce 3,6 mm. Spaliny se ochladí z 476 °C na 355 °C a dojde k ohřátí vody z 250 °C na 313,55 °C. Což je 3,5 °C pod teplotou varu (nedohřev). První část ekonomizéru (studenější) je řešena jako žebrovaný výměník s vystřídaným uspořádáním, průměrem trubky 32 mm (bez žebra) a tloušťce 3,6 mm. Spaliny se ochladí z 355 °C na 220 °C a dojde k ohřátí vody z 220 °C na 250 °C.




*Obrázek 9: Schéma EKO 2*

## 12.1 Ekonomizér výstupní část (EKO 2)

*Tabulka 15: Geometrie výstupní části ekonomizéru*

| **Rozměry EKO 2** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | D | 32 | [mm] |
| Tloušťka trubky | t | 3,6 | [mm] |
| Příčná rozteč | s1 | 85 | [mm] |
| Podélná rozteč | s2 | 90 | [mm] |
| Počet příčných řad | z1 | 97 | [mm] |
| Počet podélných řad | z2 | 14 | [-] |
| Průměr s žebrem | Dž | 52 | [-] |
| Výška žebra | hž | 10 | [mm] |
| Tloušťka žebra | tž | 1 | [mm] |
| Počet žeber | nž | 203 | [1/m] |
| Rozteč žeber | sž | 4,93 | [mm] |

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\,in} + t_{SP\,out}}{2} = \frac{476 + 355}{2} = 415{,}5\ °C \tag{12.1}$$

**Světlý průřez**

$$F_S = \left[1 - \frac{1}{\frac{s_1}{D}} \cdot (1 + 2 \cdot \frac{h_{\check{z}}}{s_{\check{z}}} \cdot \frac{t_{\check{z}}}{D})\right] \cdot b \cdot c = \left[1 - \frac{1}{\frac{0{,}085}{0{,}032}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{0{,}01}{4{,}65} \cdot \frac{0{,}001}{0{,}032}\right)\right] \cdot 8{,}404 \cdot 4{,}41$$

$$F_S = 21{,}32\ m^2 \tag{12.2}$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{21{,}32} \cdot \frac{273{,}15 + 415{,}5}{273{,}15} = 8{,}26\ m/s \tag{12.3}$$

### 12.1.1 Přestup tepla konvekcí

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{1r} = \left[\frac{S_{\check{z}}}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right] \cdot \frac{\psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k} = [0{,}878 \cdot 0{,}93 \cdot 1 + 0{,}122] \cdot \frac{40 \cdot 43{,}74}{1 + 0 \cdot 40 \cdot 43{,}74}$$

$$\alpha_{1r} = 34{,}91\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{12.4}$$

**Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin (kruhová žebra)**

$$\frac{S_{\check{z}}}{S} = \frac{\left(\frac{D_{\check{z}}}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\check{z}}}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot (\frac{s_{\check{z}}}{D} - \frac{t_{\check{z}}}{D})} = \frac{\left(\frac{0{,}052}{0{,}032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0{,}052}{0{,}032}\right)^2 - 1 + 2 \cdot (\frac{0{,}0049}{0{,}032} - \frac{0{,}001}{0{,}032})} = 0{,}87 \tag{12.5}$$

**Podíl volných částí trubky (bez žeber) a celkové plochy na straně spalin**

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_{\check{z}}}{S} = 1 - 0{,}878 = 0{,}13 \tag{12.6}$$

**Součinitel β**

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{t_{\check{z}} \cdot \lambda_{\check{z}} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}85 \cdot 43{,}74}{0{,}001 \cdot 40 \cdot (1 + 0 \cdot 0{,}85 \cdot 43{,}74)}} = 43{,}11 \tag{12.7}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro žebrované trubky (kruhové) uspořádané za sebou**

$$\alpha_k = 0{,}105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{s_{\check{z}}} \cdot \left(\frac{D}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{h_{\check{z}}}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{w \cdot s_{\check{z}}}{\nu}\right)^{0{,}72} \tag{12.8}$$

$$\alpha_k = 0{,}105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}059}{0{,}0049} \cdot \left(\frac{0{,}032}{0{,}0049}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{0{,}01}{0{,}0049}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{7{,}97 \cdot 0{,}01}{6{,}31 \cdot 10^{-5}}\right)^{0{,}72}$$

$$\alpha_k = 43{,}74 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Součinitel efektivnosti žebra E se odečte z grafu. Určuje se ze závislosti $\beta \cdot h_{\check{z}}$ *a* $D_{\check{z}}/D$.

Opravný koeficient $C_z = 1$ pro $z_1 \geq 4$.

Opravný koeficient $C_s = 1$ pro $s_2/D > 2$.

Koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení $\alpha_k$ po povrchu žebra $\psi_{\check{z}} = 0{,}85$.

Součinitel rozšíření žebra $\mu = 1$ pro konstantní tloušťku žebra.

### 12.1.2 Prostup tepla

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha_{1r} = 34{,}91 \ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{12.9}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{226 - 41{,}45}{ln\frac{226}{41{,}45}} = 108{,}81\ °C \tag{12.10}$$

**Potřebná plocha EKO 1**

$$S_{E1} = \frac{Q_E \cdot 0{,}5 \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{13137{,}87 \cdot 1000}{33{,}23 \cdot 108{,}81} = 3458{,}41\ m^2 \tag{12.11}$$

**Plocha jednoho metru trubky**

$$S_{1m} = \pi \cdot D - \pi \cdot D \cdot n_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} + \pi \cdot \frac{D_{\check{z}}^2 - D^2}{4} \cdot 2 \cdot n_{\check{z}} + \pi \cdot D_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} \tag{12.12}$$

$$S_{1m} = \pi \cdot 0{,}032 - \pi \cdot 0{,}032 \cdot 203 \cdot 0{,}001 + \pi \cdot \frac{0{,}052^2 - 0{,}032^2}{4} \cdot 2 \cdot 203 + \pi \cdot 0{,}052 \cdot 215 \cdot 0{,}001$$

$$S_{1m} = 0{,}636\ m^2$$

**Potřebná délka trubek**

$$l = \frac{S_{E1}}{S_{1m}} = \frac{3632{,}98}{0{,}668} = 5435{,}75\ m \tag{12.13}$$

**Potřebná délka 1 trubky**

$$l_{1T} = \frac{S}{z_1 \cdot z_2} = \frac{5435{,}75}{97 \cdot 14} = 56{,}04\ m \tag{12.14}$$

**Počet řad**

$$n_{\check{r}} = \frac{S_{1T}}{l} = \frac{56{,}04}{4} = 14{,}01\ \Rightarrow\ 14 \tag{12.15}$$

**Skutečná délka 1 trubky**

$$l_{1T\ skut} = 56\ m \tag{12.16}$$

**Skutečná délka trubek**

$$l_{skut} = l_{1T\ skut} \cdot z_1 \cdot z_2 = 56 \cdot 97 = 5432\ m \tag{12.17}$$

**Skutečná plocha trubek**

$$S_{E2\ skut} = S_{1m} \cdot l_{skut} = 0{,}668 \cdot 5432 = 3456{,}03\ m^2 \tag{12.18}$$

**Skutečný výkon**

$$Q_{E2\ skut} = \frac{k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{E2\ skut}}{1000} = \frac{34{,}91 \cdot 108{,}81 \cdot 3456{,}03}{1000} = 13128{,}81\ kW \tag{12.19}$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{E2\ skut} - Q_{E2}}{Q_{E2\ skut}} \cdot 100 = \frac{13128{,}81\ - 13137{,}87}{13128{,}81} \cdot 100 = 0{,}07\ \% \tag{12.20}$$

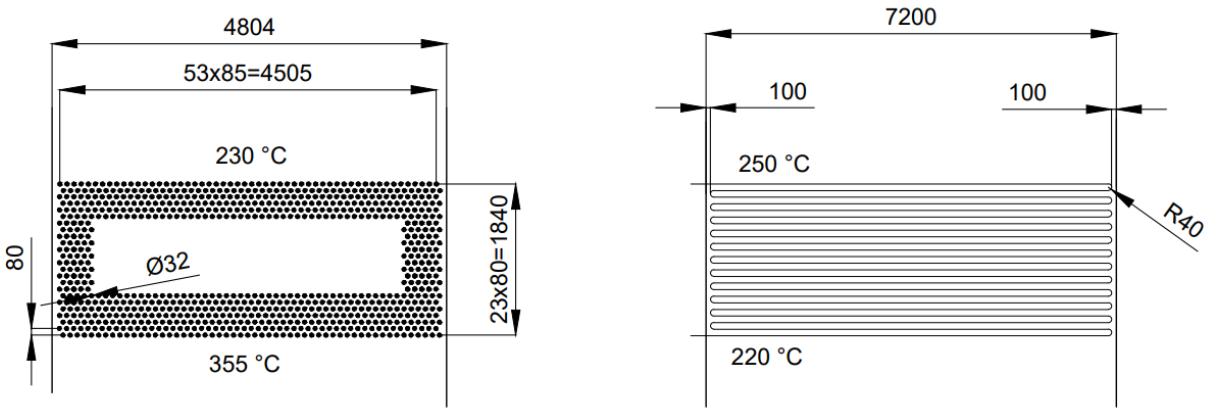
### 12.1.3 Tepelná bilance EKO 2

**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_{KV} \cdot h}{m_{pal}} = 1911\ \ - \frac{13137{,}87 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 1403\ kJ/Nm^3 \tag{12.21}$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 355 °C.

## 12.2 Ekonomizér vstupní část (EKO 1)




*Obrázek 10: Schéma EKO 1*

*Tabulka 16: Geometrie vstupní části ekonomizéru*

| **Rozměry EKO 1** | | | |
|---|---|---|---|
| Průměr trubky | D | 32 | [mm] |
| Tloušťka trubky | t | 3,6 | [mm] |
| Příčná rozteč | s1 | 85 | [mm] |
| Podélná rozteč | s2 | 80 | [mm] |
| Počet příčných řad | z1 | 54 | [mm] |
| Počet podélných řad | z2 | 24 | [-] |
| Průměr s žebrem | Dž | 52 | [-] |
| Výška žebra | hž | 10 | [mm] |
| Tloušťka žebra | tž | 1 | [mm] |
| Počet žeber | nž | 250 | [1/m] |
| Rozteč žeber | sž | 4 | [mm] |

**Střední teplota**

$$t_s = \frac{t_{SP\ in} + t_{SP\ out}}{2} = \frac{355 + 230}{2} = 292{,}5\ °C \qquad (12.22)$$

**Světlý průřez**

$$F_S = \left[1 - \frac{1}{\frac{s_1}{D}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{h_ž}{s_ž} \cdot \frac{t_ž}{D}\right)\right] \cdot b \cdot c = \left[1 - \frac{1}{\frac{0{,}085}{0{,}032}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{0{,}01}{4} \cdot \frac{0{,}001}{0{,}032}\right)\right] \cdot 8{,}404 \cdot 4{,}41$$

$$F_S = 20{,}92\ m^2 \qquad (12.23)$$

**Rychlost spalin**

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \frac{273{,}15 + t_s}{273{,}15} = \frac{69{,}91}{20{,}92} \cdot \frac{273{,}15 + 292{,}5}{273{,}15} = 6{,}92\ m/s \tag{12.24}$$

### 12.2.1 Přestup tepla konvekcí

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{1r} = \left[\frac{S_{\check{z}}}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right] \cdot \frac{\psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k} = [0{,}897 \cdot 0{,}93 \cdot 1 + 0{,}103] \cdot \frac{40 \cdot 58{,}96}{1 + 0 \cdot 40 \cdot 58{,}96}$$

$$\alpha_{1r} = 46{,}97\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{12.25}$$

**Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin (kruhová žebra)**

$$\frac{S_{\check{z}}}{S} = \frac{\left(\frac{D_{\check{z}}}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\check{z}}}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{s_{\check{z}}}{D} - \frac{t_{\check{z}}}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0{,}052}{0{,}032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0{,}052}{0{,}032}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0{,}004}{0{,}032} - \frac{0{,}001}{0{,}032}\right)} = 0{,}897 \tag{12.26}$$

**Podíl volných částí trubky (bez žeber) a celkové plochy na straně spalin**

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_{\check{z}}}{S} = 1 - 0{,}897 = 0{,}103 \tag{12.27}$$

**Součinitel β**

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{t_{\check{z}} \cdot \lambda_{\check{z}} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}85 \cdot 58{,}96}{0{,}001 \cdot 40 \cdot (1 + 0 \cdot 0{,}85 \cdot 58{,}96)}} = 50{,}06 \tag{12.28}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro žebrované trubky (kruhové) uspořádané za sebou**

$$\alpha_k = 0{,}23 \cdot C_z \cdot \varphi_\sigma^{0{,}2} \cdot \frac{\lambda}{s_{\check{z}}} \cdot \left(\frac{D}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{h_{\check{z}}}{s_{\check{z}}}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{w \cdot s_{\check{z}}}{\nu}\right)^{0{,}65} \tag{12.29}$$

$$\alpha_k = 0{,}23 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}9^{0{,}2} \cdot \frac{0{,}045}{0{,}004} \cdot \left(\frac{0{,}032}{0{,}004}\right)^{-0{,}54} \cdot \left(\frac{0{,}01}{0{,}004}\right)^{-0{,}14} \cdot \left(\frac{6{,}92 \cdot 0{,}01}{4{,}48 \cdot 10^{-5}}\right)^{0{,}65}$$

$$\alpha_k = 58{,}97\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Parametr $\varphi_\sigma$**

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2^{'} - 1} = \frac{2{,}66 - 1}{2{,}83 - 1} = 0{,}9 \tag{12.30}$$

$$\sigma_2^{'} = \sqrt{0{,}25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0{,}25 \cdot 2{,}66^2 \cdot 2{,}5^2} = 2{,}83 \tag{12.31}$$

Součinitel efektivnosti žebra E se odečte z grafu. Určuje se ze závislosti $\beta \cdot h_{\check{z}}$ *a* $D_{\check{z}}/D$.

Opravný koeficient $C_z = 1{,}1$ (odečteno z grafu v závislosti na počtu řad).

Koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení $\alpha_k$ po povrchu žebra $\psi_{\check{z}} = 0{,}85$.

Součinitel rozšíření žebra $\mu = 1$ pro konstantní tloušťku žebra.

### 12.2.2 Prostup tepla

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha_{1r} = 46{,}97 \ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{12.32}$$

**Střední logaritmický teplotní rozdíl**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{105 - 10}{ln \frac{105}{10}} = 40{,}40 \ °C \tag{12.33}$$

**Potřebná plocha EKO 1**

$$S_{E1} = \frac{Q_E \cdot 0{,}5 \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{13137{,}87 \cdot 1000}{45{,}54 \ \cdot 40{,}40} = 6923{,}14 \ m^2 \tag{12.34}$$

**Plocha jednoho metru trubky**

$$S_{1m} = \pi \cdot D - \pi \cdot D \cdot n_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} + \pi \cdot \frac{D_{\check{z}}^2 - D^2}{4} \cdot 2 \cdot n_{\check{z}} + \pi \cdot D_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} \tag{12.35}$$

$$S_{1m} = \pi \cdot 0{,}032 - \pi \cdot 0{,}032 \cdot 250 \cdot 0{,}001 + \pi \cdot \frac{0{,}052^2 - 0{,}032^2}{4} \cdot 2 \cdot 250 + \pi \cdot 0{,}052 \cdot 250 \cdot 0{,}001$$

$$S_{1m} = 0{,}76 \ m^2$$

**Potřebná délka trubek**

$$l = \frac{S_{E1}}{S_{1m}} = \frac{6923{,}14}{0{,}76} = 9106{,}22 \ m^2 \tag{12.36}$$

**Potřebná délka 1 trubky**

$$l_{1T} = \frac{l}{z_1 \cdot z_2} = \frac{9106{,}22}{54 \cdot 22} = 7{,}03\ m \tag{12.37}$$

**Skutečná délka 1 trubky**

$$l_{1T\ skut} = 7\ m \tag{12.38}$$

**Skutečná délka trubek**

$$l_{skut} = l_{1T\ skut} \cdot z_1 \cdot z_2 = 7 \cdot 54 \cdot 24 = 9072\ m \tag{12.39}$$

**Skutečná plocha trubek**

$$S_{E1\ skut} = S_{1m} \cdot l_{skut} = 0{,}76 \cdot 9072\ m = 6897{,}12\ m^2 \tag{12.40}$$

**Skutečný výkon**

$$Q_{E1\ skut} = \frac{k \cdot \Delta t_{ln} \cdot S_{E1\ skut}}{1000} = \frac{46{,}97 \cdot 40{,}4 \cdot 6897{,}12}{1000} = 13088{,}49\ kW \tag{12.41}$$

**Odchylka**

$$\Delta Q = \frac{Q_{E1\ skut} - Q_{E1}}{Q_{E1\ skut}} \cdot 100 = \frac{13088{,}49\ - 13137{,}87}{13088{,}49} \cdot 100 = 0{,}38\ \% \tag{12.42}$$

### 12.2.3 Tepelná bilance EKO 1

**Skutečná entalpie odcházejících spalin**

$$I_{sp\ OUT}^{skut.} = I_{sp\ IN} - \frac{Q_{KV} \cdot h}{m_{pal}} = 1403\ \ - \frac{13137{,}87 \cdot 0{,}995}{25{,}7354} = 895\ kJ/Nm^3 \tag{12.43}$$

Tato entalpie odpovídá teplotě 230 °C.

# 13 Ohřívák vzduchu

Ohřívák vzduchu typu Ljungström je poslední teplosměnnou plochou kotle. Dochází zde k ochlazení spalin z 230 °C na 110 °C a ohřátí spalovacího vzduchu z 25 °C na 220 °C. Rozdělením průřezu rotoru, které odpovídá rozdělení na 24 segmentů, 13 dílů připadá na spalinové, 9 na vzduchové a 2 na těsnící.

$x_S = 0{,}542$

$x_V = 0{,}375$

$x_O = 0{,}083$

**Rychlost vzduchu**

$$w_V = \frac{V_V \cdot x_S \cdot w_S}{V_S \cdot x_V} = \frac{45{,}95 \cdot 0{,}542 \cdot 10}{69{,}91 \cdot 0{,}375} = 9{,}49\ m/s \tag{13.1}$$

**Teplota stěny listů**

$$t_{st} = \frac{t_S \cdot x_S + t_V \cdot x_V}{x_S \cdot x_V} = \frac{170 \cdot 0{,}542 + 122{,}5 \cdot 0{,}375}{0{,}542 \cdot 0{,}375} = 150{,}57\ °C \tag{13.2}$$

**Součinitel přestupu tepla při ochlazování spalin**

$$\alpha_k = C_N \cdot C_l \cdot C_f \cdot \alpha_N = 1{,}6 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}22 \cdot 39{,}5 = \ 100{,}24\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{13.3}$$

**Součinitel přestupu tepla při ohřívání vzduchu**

$$\alpha_k = C_N \cdot C_l \cdot C_f' \cdot \alpha_N = 1{,}6 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}1 \cdot 39 = \ 89{,}23\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{13.4}$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\xi \cdot P}{\frac{1}{x_V \cdot \alpha_V} + \frac{1}{x_S \cdot \alpha_S}} = \frac{0{,}9 \cdot 1}{\frac{1}{0{,}375 \cdot 89{,}23} + \frac{1}{0{,}542 \cdot 100{,}24}} = 18{,}63\ \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{13.5}$$

**Výkon ohříváku**

$$Q_{OVZ} = V_V \cdot \Delta i = 45{,}95 \cdot 420{,}63 = 19326{,}05\ kW \tag{13.6}$$

**Plocha ohříváku**

$$S = \frac{Q_{OVZ}}{k \cdot \Delta tln} = \frac{19326{,}05 \cdot 1000}{18{,}63 \cdot 35{,}05} = 29596{,}43\ m^2 \tag{13.7}$$

**Výška výplně**

$$h = \frac{4 \cdot S}{0{,}95 \cdot pi \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot z} = \frac{4 \cdot 29596{,}43}{0{,}95 \cdot pi \cdot 5{,}86^2 \cdot 0{,}915 \cdot 325 \cdot 2} = 1{,}94\ m \qquad (13.8)$$

**Kolísání teploty plechů**

$$\Delta t_{st} = \frac{120 \cdot Q_{OVZ}}{S \cdot c \cdot \rho \cdot d \cdot n} = \frac{120 \cdot 19326{,}05}{29596{,}43 \cdot 0{,}5 \cdot 7850 \cdot 0{,}008 \cdot 3} = 0{,}83\ °C < 10\ °C \qquad (13.9)$$

# 14 Teplota rosného bodu

Jelikož není ve spalovaném palivu obsažena síra, která by kondenzovala dříve než vodní pára, tak se teplota rosného bodu určí jako teplota kondenzace vodní páry.

**Střední zdánlivá molová hmotnost**

$$M = \sum_i M_i \cdot x_i = 28 \cdot 0{,}669 + 44 \cdot 0{,}170 + 32 \cdot 0{,}018 + 39{,}9 \cdot 0{,}006 = 27{,}02 \quad (14.1)$$

**Měrná plynová konstanta**

$$r = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{27{,}02} = 307{,}68\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (14.2)$$

**Měrná vlhkost**

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{M_i \cdot x_i}{M} = \frac{18 \cdot 0{,}372}{27{,}02} = 0{,}248 \quad (14.3)$$

**Parciální tlak**

$$pp = \frac{x \cdot p}{\frac{r_v}{r_p} \cdot x} = \frac{0{,}248 \cdot 97347}{\frac{307{,}68}{462} \cdot 0{,}248} = 30921{,}14\ Pa = 30{,}921\ kPa \quad (14.4)$$

Parciálnímu tlaku 30,921 kPa odpovídá teplota rosného bodu přibližně 70 °C.

# 15 Kontrola tepelného výkonu

Výrobní teplo páry se od tepla předaného spalinami nesmí lišit o více jak 0,5 %. Toho bylo dosaženo na všech výhřevných plochách.

*Tabulka 17: Přehled tepelných výkonů v jednotlivých plochách*

| Teplosměnná plocha | Parní výkon [kW] | Výkon předaný spalinami [kW] | Odchylka [%] |
|---|---|---|---|
| Přehřívák P1 | 6854,54 | 6870,60 | 0,23 |
| Přehřívák P3 | 17836,01 | 17879,23 | 0,24 |
| Přehřívák P4 | 11733,33 | 11731,73 | 0,01 |
| Přehřívák P2 | 11020,69 | 11013,99 | 0,06 |
| Závěsné trubky | 9792,20 | 9790,56 | 0,02 |
| Výparník | 71286,50 | 71298,07 | 0,02 |
| Ekonomizér | 26275,73 | 26261,99 | 0,22 |
| Celkový výkon | 154799 | 154846,17 | 0,03 |

# Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout kotel na spalování vysokopecního plynu se stabilizací zemním plynem (požadavky na parametry páry $p = 9{,}8\ MPa,\ t = 220\ °C\ \ t/h$). Požadavek na vysokou účinnost byl splněn dostatečně ($\eta_k = 91{,}9$ %). Kotel je řešen jako čtyřtahový, kde se dva tahy nachází nad spalovací komorou.

V prvním tahu jsou umístěny všechny čtyři přehříváky, které jsou řešeny jako souproudé s hladkými trubkami. První teplosměnnou plochou nad spalovací komorou je přehřívák P1, což je přehřívák s nejnižší teplotou páry. Umístěn je první kvůli tomu, aby nedošlo k propalu varnic. Dále následují přehříváky v pořadí P3, P4 a P2. Mezi každé dva přehříváky je vložen vstřik pro regulaci teploty páry. Další teplosměnnou plochou v prvním tahu jsou závěsné trubky, které slouží k podepření přehříváku a dochází v nich k částečnému předehřevu páry.

Všechny přehříváky se podařilo navrhnout s minimální odchylkou tepelného výkonu od vypočteného. Přehřívák P3 má nejvyšší rozdíl ve výkonu, a to konkrétně 0,24 %. Poslední teplosměnnou plochou v 1. tahu je část obratové komory do 2. tahu. Celý tah kotle je řešen membránovou stěnou.

Na začátku druhého tahu je umístěna výparníková mříž, která je řešena jako rozvolněná membránová stěna. První teplosměnnou plochou ve 2. tahu je konvekční výparník, který dodává zbytek výkonu, na který nestačí spalovací komora a membránová stěna. Druhou a poslední teplosměnnou plochou ve druhém tahu je druhá část ekonomizéru.

Obratová komora do 3. tahu je oplechovaná a nepředává teplo médiu. Ve třetím tahu je jedinou teplosměnnou plochou první část ekonomizéru. Ve 4. tahu je poslední teplosměnná plocha, ohřívák vzduchu Ljungström. Konvekční výparník i obě části ekonomizéru jsou tvořeny žebrovanými trubkami.

Maximální dovolená odchylka od spočítaného a navrženého tepelného výkonu je 0,5 %. Toto kritérium bylo splněno, neboť maximální odchylka je 0,24 %. Teplota spalin za poslední teplosměnnou plochou je zhruba o 40 °C vyšší než teplota rosného bodu. Díky takovému rozdílu je kotel dobře chráněn před nízkoteplotní korozí.

# Seznam použitých zdrojů

[1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0426-4.

[2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

[3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3955-9.

# Seznam zkratek a značek

| Symbol | Jednotka | Název |
|---|---|---|
| $A$ | m | Šířka spalinového kanálu |
| $a$ | - | Stupeň černosti proudu spalin |
| $a_o$ | - | Stupeň černosti ohniště |
| $a_{ns}$ | - | Stupeň černosti nesvítivé části plamene |
| $a_{pl}$ | - | Stupeň černosti plamene |
| $a_{st}$ | - | Stupeň černosti povrchu stěn |
| $a_{sv}$ | - | Stupeň černosti svítivé části plamene |
| $B$ | m | Délka spalovacího kanálu |
| $Bo$ | - | Boltzmanovo číslo |
| $C_s$ | - | Opravný součinitel na uspořádání svazku |
| $C_z$ | - | Opravný součinitel na počet řad svazku |
| $D$ | m | Vnější průměr trubky |
| $d$ | m | Vnější průměr trubky |
| $d_e$ | m | Ekvivalentní průměr |
| $D_{ž}$ | m | Průměr trubky s žebrem |
| $E$ | - | Součinitel efektivnosti žebra |
| $F_S$ | $m^2$ | Světlý průřez spalinového kanálu |
| $h_{ž}$ | m | Výška žebra |
| $i_{NV}$ | $kJ \cdot kg^{-1}$ | Entalpie napájecí vody |
| $i_{pp}$ | $kJ \cdot kg^{-1}$ | Entalpie páry |
| $I_{SPmin}$ | $kJ \cdot Nm^{-3}$ | Entalpie minimálního objemu spalin |
| $I_{VZ\ min}$ | $KJ \cdot Nm^{-3}$ | Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu |
| $I_{SP\ \alpha}$ | $KJ \cdot Nm^{-3}$ | Entalpie spalin s přebytkem vzduchu |
| $k$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Součinitel prostupu tepla |
| $k \cdot p \cdot s$ | - | Optická hustota spalin |
| $k_S \cdot r_S$ | - | Součinitel zeslabení sálání |
| $k_{sz}$ | - | Součinitel zeslabení sálání sazí |
| $M$ | - | Součinitel respektující průběh teplot v ohništi |
| $M$ | - | Střední zdánlivá molová hmotnost |
| $M_{pal}$ | $Nm^3 \cdot s^{-1}$ | Množství paliva |
| $M_{pp}$ | $kg \cdot s^{-1}$ | Hmotnostní tok páry |
| $M_V$ | $kg \cdot s^{-1}$ | Hmotnostní tok vstřikované vody |
| $n$ | - | Počet trubek |
| $M$ | m | Obvod světlého průřezu kanálu |
| $O$ | m | Obvod průřezu kanálu |
| $O_x$ | $Nm^3/Nm^3$ | Objem určité složky spalin |
| $O_{H20}^V$ | $Nm^3/Nm^3$ | Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu |
| $O_{H2O}^S$ | $Nm^3/Nm^3$ | Objem vodní páry ve spalinách |
| $O_S c_S$ | - | Střední tepelná jímavost spalin v ohništi |
| $O_{SP}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Skutečný objem vlhkých spalin |
| $O_{SS\ min}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Objem suchých spalin |

| | | |
|---|---|---|
| $O_{SV\,min}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Minimální objem vlhkých spalin |
| $O_{VS\,min}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Minimální objem suchého vzduchu |
| $O_{VV\,min}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Minimální objem vlhkého vzduchu |
| $O_{VZ}$ | $Nm^3/Nm^3$ | Skutečný objem vlhkého vzduchu |
| $p$ | Pa | Tlak |
| $pp$ | Pa | Parciální tlak vodní páry |
| $Pr$ | - | Prandtlova číslo |
| $p_S$ | Pa | Parciální tlak tříatomových plynů |
| $Q$ | W | Tepelný výkon |
| $Q_{cz}$ | $kJ \cdot Nm^{-3}$ | Teplo pro předehřev vzduchu |
| $Q_i^r$ | $kJ \cdot Nm^{-3}$ | Výhřevnost paliva |
| $Q_{i\,red}$ | $kJ \cdot Nm^{-3}$ | Redukovaná výhřevnost |
| $Q_P$ | kW | Tepelný výkon přehříváku |
| $Q_v$ | MW | Výrobní teplo |
| $q_v$ | $kW \cdot m^3$ | Objemové zatížení ohniště |
| $r$ | $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | Měrná plynová konstanta |
| $r_{CO_2}$ | - | Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách |
| $r_{H_2O}$ | - | Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách |
| $R_m$ | $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | Univerzální plynová konstanta |
| $r_S$ | - | Objemový podíl tříatomových plynů |
| $s$ | m | Efektivní tloušťka sálavé vrstvy |
| $s_1$ | m | Příčná rozteč |
| $s_2$ | m | Podélná rozteč |
| $S_{P1}$ | $m^2$ | Plocha přehříváku |
| $S_{st}$ | $m^2$ | Povrch stěn ohniště |
| $S_{ZT}$ | $m^2$ | Plocha závěsných trubek |
| $\frac{S_{ž}}{S}$ | - | Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin |
| $\frac{S_h}{S}$ | - | Podíl volných částí trubky (bez žeber) a celkové plochy na straně spalin |
| $s_{ž}$ | 1/m | Počet žeber na metr |
| $t$ | ˚C | Teplota |
| $T_Z$ | K | Absolutní teplota zaneseného povrchu stěny |
| $t$ | m | Tloušťka stěny trubky |
| $t_{np}$ | ˚C | Teplota nechlazeného plamene |
| $t_{ok}$ | ˚C | Teplota na konci ohniště |
| $t_s$ | ˚C | Střední teplota spalin |
| $t_{st}$ | ˚C | Teplota stěny listů |
| $t_{ž}$ | m | Tloušťka žebra |
| $V_o$ | $m^3$ | Objem spalovací komory |
| $V_S$ | $Nm^3$ | Průtok spalin |
| $w_S$ | $m \cdot s^{-1}$ | Rychlost spalin |
| $w_V$ | $m \cdot s^{-1}$ | Rychlost vzduchu |
| $x$ | $kg \cdot kg_{sv}^{-1}$ | Měrná vlhkost |

| | | |
|---|---|---|
| $z_1$ | - | Počet příčných řad |
| $z_2$ | - | Počet podélných řad |
| $Z_{CO}$ | % | Ztráta chemickým nedopalem |
| $Z_k$ | % | Komínová ztráta |
| $Z_r$ | % | Nepočitatelná ztráta |
| $Z_{sv}$ | % | Ztráta sdílením tepla do okolí |
| $\alpha$ | - | Součinitel přebytku vzduchu |
| $\alpha_K$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Součinitel přestupu tepla konvekci |
| $\alpha_S$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Celkový součinitel přestupu tepla |
| $\alpha_{sal}$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Součinitel přestupu tepla sáláním |
| $\alpha_{1r}$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ | Redukovaný součinitel přestupu tepla ze spalinové strany |
| β | - | Pomocný součinitel k výpočtu efektivnosti žebra |
| $\beta_{OVZ}$ | - | Součinitel přebytku vzduchu |
| δ | m | Tloušťka žebra |
| $\Delta t_{ln}$ | ˚C | Střední logaritmický teplotní spád |
| $\Delta t_m$ | ˚C | Menší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku |
| $\Delta t_v$ | ˚C | Větší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku |
| $\varepsilon$ | $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ | Součinitel zanesení plochy |
| $\xi$ | - | Součinitel využití |
| $\eta_k$ | % | Tepelná účinnost kotle |
| $\nu$ | $m^2 \cdot s^{-1}$ | Kinematická viskozita |
| $\lambda$ | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ | Součinitel tepelné vodivosti |
| $\lambda_{ž}$ | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ | Tepelná vodivost materiálu žebra |
| μ | - | Součinitel rozšíření žebra |
| φ | % | Relativní vlhkost |
| $\psi$ | - | Součinitel tepelné efektivnosti |
| $\psi_{ž}$ | - | Koeficient nerovnoměrného rozložení $\alpha_k$ po povrchu žebra |
| $\omega$ | - | Součinitel omývání plochy |
| $\sigma_1$ | - | Poměrná přímá rozteč |
| $\sigma_2$ | - | Poměrná podélná rozteč |
| $\sigma_2'$ | - | Redukovaná podélná poměrná rozteč |

## Seznam horních a dolních indexů

| | |
|---|---|
| B | Buben |
| C | Celkový |
| E | Ekonomizér |
| in | Vstupní |
| KV | Konvekční výparník |
| max | Maximální |
| min | Minimální |
| MS | Membránová stěna |

| | |
|---|---|
| N | Nedohřev |
| np | Nechlazený plamen |
| O | Odluh |
| ok | Konec ohniště |
| out | Výstupní |
| OVZ | Ohřívák vzduchu |
| P1, P2, P3, P4 | Přehříváky |
| S | Spaliny |
| V | Vzduch |
| ZT | Závěsné trubky |

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení jednotlivých paliv a směsi ..... 16
Tabulka 2: Měrná entalpie složek spalin ..... 20
Tabulka 3: Entalpie spalin a vzduchu ..... 21
Tabulka 4: Geometrie přehříváku P1 ..... 36
Tabulka 5: Geometrie závěsných trubek ..... 40
Tabulka 6: Geometrie přehříváku P3 ..... 44
Tabulka 7: Geometrie závěsných trubek ..... 48
Tabulka 8: Geometrie přehříváku P4 ..... 52
Tabulka 9: Geometrie závěsných trubek ..... 56
Tabulka 10: Geometrie přehříváku P2 ..... 59
Tabulka 11: Geometrie závěsných trubek ..... 63
Tabulka 12: Geometrie obratové komory ..... 66
Tabulka 13: Geometrie výparníkové mříže ..... 70
Tabulka 14: Geometrie konvekčního výparníku ..... 78
Tabulka 15: Geometrie výstupní části ekonomizéru ..... 83
Tabulka 16: Geometrie vstupní části ekonomizéru ..... 87
Tabulka 17: Přehled tepelných výkonů v jednotlivých plochách ..... 94

# Seznam obrázků

Obrázek 1: I-t diagram vzduchu a spalin v závislosti na přebytku vzduchu ..... 22
Obrázek 2: Schéma a základní rozměry spalovací komory ..... 25
Obrázek 3: Pilový diagram ..... 35
Obrázek 4: Schéma přehříváku P1 ..... 36
Obrázek 5: Schéma přehříváku P3 ..... 44
Obrázek 6: Schéma přehříváku P4 ..... 52
Obrázek 7: Schéma přehříváku P2 ..... 59
Obrázek 8: Schéma konvekčního výparníku ..... 78
Obrázek 9: Schéma EKO 2 ..... 83
Obrázek 10: Schéma EKO 1 ..... 87