VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

# KOTEL NA SPALOVÁNÍ DŘEVA S HNĚDÝM UHLÍM (VÁHOVÝ POMĚR 50/50), 30 T/H

STEAM BOILER FOR BURNING MIX OF WOOD AND SUB-BITUMINOUS COAL (MIXING 50/50), 30 T/H

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

VEDOUCÍ PRÁCE — Bc. JIŘÍ CHMELÍČEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2012/2013

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Chmelíček

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

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

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

**Kotel na spalování dřeva s hnědým uhlí (váhový poměr 50/50),30t/h**

v anglickém jazyce:

**Steam boiler for burnig mix of wood and sub-bituminous coal(mixing 50/50).35t/h**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte kotle na kombinované spalování čistého dřeva s hnědým uhlím v poměru 50/50.Parametry kotle:
parní výkon 30 t/h ,tlak přehřáté páry 5 MPa,teplota přehřáté páry 450°C

Cíle diplomové práce:

Návrh uspořádání ploch a jejich dimenzování.
Tepelný výpočet
V ýpočtový projekt

Seznam odborné literatury:

Černý V.,Janeba B.,Teysler J.: Parní kotle ,technický průvodce, SNTL Praha
Dlouhý T.: Výpočet kotlů a spalinových výměníků, skritpum ČVUT v Prřaze
Jandačka J.:Mikulí M.:Technologie pre zyšovanie energetického potenciálu biomasy,ISBN 978-80-969595-4-9

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

| | |
|---|---|
| doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.<br>Ředitel ústavu | prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.<br>Děkan fakulty |

# ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním a výpočtovým návrhem kotle na spalování dřeva a hnědého uhlí. Práce je rozdělena do několika částí. Nejprve jsou prováděny stechiometrické výpočty a entalpické výpočty vzduchu a spalin. Dále je vypočítána tepelná bilance kotle, ztráty kotle a je stanovena tepelná účinnost kotle. Po návrhu spalovací komory je proveden její tepelný výpočet. Potom jsou navrhovány rozměry tahů a jednotlivé výhřevné plochy. Na konci výpočtu se kontroluje celková tepelná bilance.



## Klíčová slova:

kotel, dřevo, hnědé uhlí, výparník, přehřívák, ztráty kotle, účinnost kotle



# ABSTRACT

This master´s thesis deals with the constructional and calculation design of the boiler for burning wood and sub-bituminous coal. The work is divided into several parts. First, stoichiometrics calculation and enthalpy calculations of air and flue gas are performed. It is calculated heat balance of the boiler, the boiler losses and the thermal efficiency of the boiler is determined. After designing the combustion chamber thermal calculation is made. Then, the dimensions and individual heating surfaces are proposed. At the end of the calculations are controlling the overall energy balance.



## Keywords:

boiler, wood, sub-bituminous coal, evaporator, superheater, losses of boiler, boiler efficiency

# BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHMELÍČEK, J. *Kotel na spalování dřeva s hnědým uhlím (váhový poměr 50/50), 30t/h.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 96 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za pomoci vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. a odborného konzultanta Ing. Pavla Křemínského a uvedl jsem všechnu použitou literaturu a jiné podklady.

V Brně dne 20. 5. 2013

……
podpis

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi CSc. a panu Ing. Pavlu Křemínskému za odborné vedení, cenné rady a užitečné připomínky při řešení výpočtu a také za poskytnutí potřebných podkladů. Děkuji také své rodině, která mě podporovala během celého studia.

# Obsah

1 Úvod ..... 12
2 Parametry kotle a složení paliva ..... 13
3 Stechiometrické výpočty ..... 14
3.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva ..... 14
3.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin ..... 15
3.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování ..... 16
4 Tepelná bilance kotle ..... 18
4.1 Teplo přivedené do kotle ..... 18
4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost ..... 19
4.3 Výrobní teplo páry a množství paliva ..... 20
5 Výpočet spalovací komory ..... 21
5.1 Výpočet ohniště z hlediska přenosu tepla ..... 22
5.1.1 Určení adiabatické teploty v ohništi ..... 22
5.1.2 Poměrná teplota spalin ..... 23
5.1.3 Součinitel M ..... 24
5.1.4 Boltzmannovo číslo ..... 24
5.1.5 Stupeň černosti ohniště ..... 25
5.2 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn ..... 26
6 Výpočet teplosměnných ploch ..... 27
6.1 Napájecí voda ..... 28
6.2 Přehřívák 3 ..... 28
6.3 Přehřívák 2 ..... 29
6.4 Přehřívák 1 ..... 30
6.5 Závěsné trubky ..... 31
6.6 Výparník ..... 31
6.7 Ekonomizér ..... 32
6.8 Celkové potřebné teplo ..... 32
6.9 Přehled ..... 32
7 Výpočet I. tahu ..... 33
8 Mříž ..... 34
8.1 Součinitel přestupu tepla ..... 35
8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ..... 35
8.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny ..... 35
8.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla ..... 36
8.2 Součinitel prostupu tepla ..... 36
8.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z mříže ..... 37
9 Výpočet II. tahu ..... 38
9.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny ..... 39

9.1.1 Konvekcí pro podélné proudění ... 39
9.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny ... 39
9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla ... 40
9.2 Součinitel prostupu tepla ... 40
9.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z II. tahu ... 41
10 Návrh hloubky III. tahu ... 42
11 Výpočet výsypky mezi II. a III. tahem ... 43
11.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny ... 44
11.1.1 Konvekcí pro podélné proudění ... 44
11.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny ... 44
11.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla ... 45
11.2 Součinitel prostupu tepla ... 45
11.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z výsypky ... 46
12 Výpočet III. tahu – I. část ... 47
12.1 Přehřívák 3 ... 47
12.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ... 48
12.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 49
12.1.3 Součinitel prostupu tepla ... 51
12.2 Výpočet membránových stěn ... 51
12.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 51
12.2.2 Součinitel prostupu tepla ... 53
12.3 Výpočet závěsných trubek ... 54
12.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ... 54
12.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 54
12.3.3 Součinitel prostupu tepla ... 56
12.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 1. části III. tahu ... 56
13 Výpočet III. tahu – II. část ... 57
13.1 Přehřívák 2 ... 57
13.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ... 59
13.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 59
13.1.3 Součinitel prostupu tepla ... 61
13.2 Výpočet membránových stěn ... 62
13.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 62
13.2.2 Součinitel prostupu tepla ... 64
13.3 Výpočet závěsných trubek ... 64
13.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ... 65
13.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ... 65
13.3.3 Součinitel prostupu tepla ... 66

13.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 2. části III. tahu ..... 67
14 Výpočet III. tahu – III. část a IV. tahu ..... 68
14.1 Přehřívák 1 ..... 68
14.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ..... 71
14.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ..... 71
14.1.3 Součinitel prostupu tepla ..... 73
14.2 Výpočet membránových stěn ..... 74
14.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ..... 74
14.2.2 Součinitel prostupu tepla ..... 75
14.3 Výpočet závěsných trubek ..... 76
14.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry ..... 76
14.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin ..... 77
14.3.3 Součinitel prostupu tepla ..... 78
14.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z III. části III. tahu a části IV. tahu ..... 78
15 Výpočet IV. a V. tahu ..... 79
15.1 Ekonomizér ..... 79
15.1.1 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany spalin ..... 81
15.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny ..... 81
15.1.3 Součinitel prostupu tepla ..... 81
15.1.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z ekonomizéru ..... 82
15.2 Ohřívák vzduchu ..... 83
15.2.1 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu ..... 84
15.2.2 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany spalin ..... 85
15.2.3 Součinitel prostupu tepla ..... 86
15.2.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z ohříváku vzduchu ..... 86
16 Kontrola tepelné bilance ..... 87
17 Závěr ..... 88
18 Seznam použité literatury ..... 89
19 Seznam obrázků ..... 90
20 Seznam tabulek ..... 91
21 Seznam použitých zkratek a symbolů ..... 92
22 Seznam příloh ..... 96

# 1 Úvod

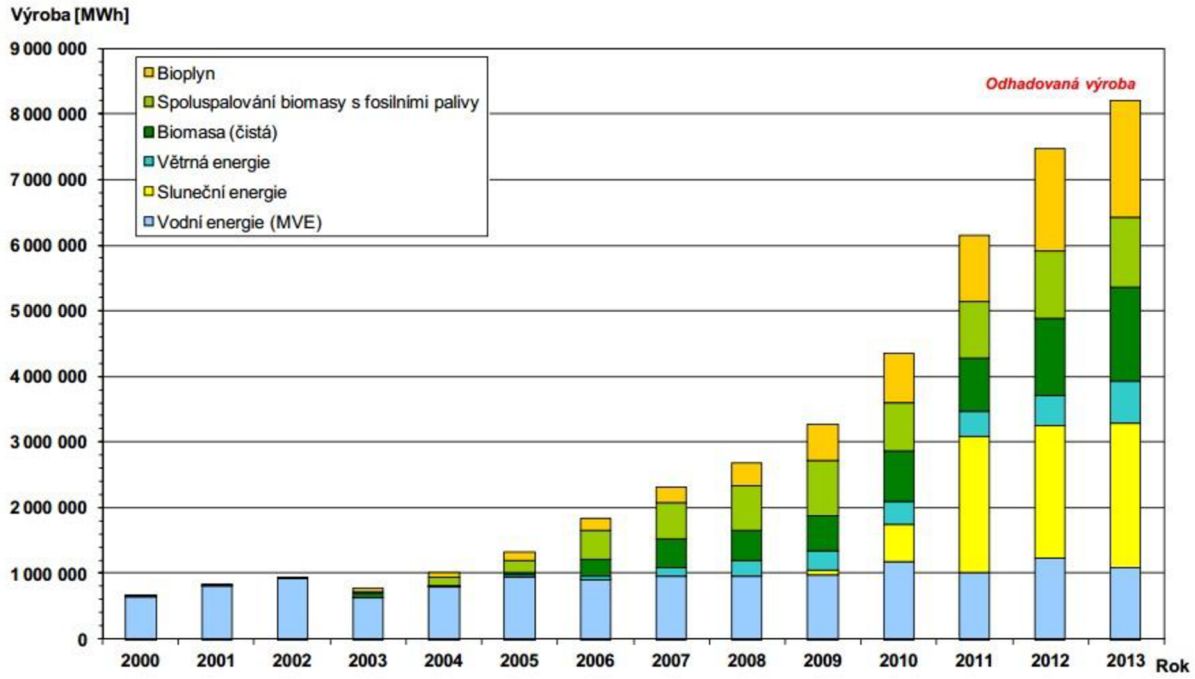
Důvodů proč spalovat biomasu s uhlím je několik. Jedním z nich je úprava škodlivin v palivu, dále standardizace paliva a například podpora při využití obnovitelného zdroje energie pomocí tzv. zelených bonusů.

Jelikož má biomasa nízký obsah síry, organického dusíku a popela, lze očekávat při jejím spoluspalování s uhlím snížení emisí jak plynných tak pevných škodlivin oproti spalování samotného uhlí. Vyšší obsah prchavé hořlaviny spolu s nízkou popelnatostí u biomasy přispívá ke snížení ztráty mechanickým nedopalem. [4]

Předmětem podpory při spalování biomasy společně s uhlím je výroba elektřiny a tepla. Konkrétně se jedná o kategorie S1, S2 a S3 v procesu spoluspalování biomasy a neobnovitelného zdroje. Tyto kategorie jsou uvedeny ve vyhlášce č. 477/2012 o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů.

Tato vyhláška definuje pojem spoluspalování. Je to společné spalování v zařízeních, kde dochází k mísení různých druhů paliva v jednom topeništi, nebo před vstupem do topeniště, přičemž fyzikálně je možné rozlišit energii vzniklou spálením směsi pouze na základě parametrů jednotlivých složek paliva, jakými jsou například hmotnostní podíl, vlhkost, výhřevnost, obsah popelovin, poměr uhlíku a dusíku. [5]

Vývoj využití spoluspalování biomasy s fosilními palivy v České republice popisuje následující obrázek.




***Obr. 1.1** –Výroba elektřiny z OZE [3]*

# 2 Parametry kotle a složení paliva

Parní kotel je navrhován jako roštový pro spalování čistého dřeva a hnědého uhlí, přičemž váhový poměr mísení je 50/50 – dřevo/hnědé uhlí. Zadané parametry kotle jsou:

- výkon kotle 30t/h
- tlak přehřáté páry 5 MPa
- teplota přehřáté páry 450°C
- teplota napájecí vody 105°C

Složení čistého dřeva:

| $Q_i^r$ | $C^r$ | $N^r$ | $S^r$ | $A^r$ | $H^r$ | $O^r$ | W | $Cl^r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [MJ/kg] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 11,1 | 31,95 | 0,02 | 0,13 | 0,2 | 4,02 | 28,68 | 35 | max. 0,02 |

***Tab. 2.1*** *– Složení čistého dřeva*

Složení hnědého uhlí:

| $Q_i^r$ | $C^r$ | $N^r$ | $S^r$ | $A^r$ | $H^r$ | $O^r$ | W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [MJ/kg] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 16,9 | 42,77 | 0,53 | 0,84 | 9,21 | 3,34 | 13,61 | 29,7 |

***Tab. 2.2*** *– Složení hnědého uhlí*

Pro stanovení složení nového paliva stačí jednotlivé hodnoty u čistého dřeva a hnědého uhlí zprůměrovat, jelikož jsou v poměru 50/50. V dalších výpočtech se bude uvažovat s tímto vzorkem paliva.

Složení nového paliva:

| $Q_i^r$ | $C^r$ | $N^r$ | $S^r$ | $A^r$ | $H^r$ | $O^r$ | W | $Cl^r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [MJ/kg] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 14 | 37,36 | 0,28 | 0,49 | 4,70 | 3,68 | 21,15 | 32,35 | max. 0,01 |

***Tab. 2.3*** *– Složení nového paliva*

| | | | |
|---|---|---|---|
| $Q_i^r$ | - | výhřevnost paliva | [kJ/kg] |
| $C^r$ | - | obsah uhlíku v palivu | [%] |
| $N^r$ | - | obsah dusíku v palivu | [%] |
| $S^r$ | - | obsah síry v palivu | [%] |
| $A^r$ | - | obsah popela v palivu | [%] |
| $H^r$ | - | obsah vodíku v palivu | [%] |
| $O^r$ | - | obsah kyslíku v palivu | [%] |
| W | - | obsah vody v palivu | [%] |
| $Cl^r$ | - | obsah chloru v palivu | [%] |

# 3 Stechiometrické výpočty

Počítané hodnoty (objemy a entalpie) jsou vztaženy na 1 kg spáleného tuhého paliva za normálních podmínek, tj. při teplotě 0°C a tlaku 0,101 MPa. Vzorce jsou odvozeny za předpokladu dokonalého spalování, přesto se ale používají i při malém chemickém nedopalu, který je dán normou kotlových ztrát.

## 3.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva

**Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva:**

$$O_{O2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2{}^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O_2{}^r}{32} \right)$$

$$O_{O2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{37,36}{12,01} + \frac{3,68}{4,032} + \frac{0,485}{32,06} - \frac{21,145}{32} \right) = \underline{0,7563\,m^3/kg}$$

**Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva:**

$$O^S_{VZmin} = \frac{100}{21} \cdot O_{O2min} = \frac{100}{21} \cdot 0,7563 = \underline{3,6014\,m^3/kg}$$

**Objem vodní páry na 1 m3 suchého vzduchu:**

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - p''} = 0,7 \cdot 0,044 = \underline{0,0308}$$

| | | |
|---|---|---|
| φ | - | relativní vlhkost vzduchu, φ=0,7 |
| p“ | - | absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu |
| $p_c$ | - | celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu |

Z [1] určíme velikost výrazu pro 30°C $\frac{p''}{p_c - p''} = 0,044$

**Součinitel f pro výpočet minimálního množství vlhkého vzduchu:**

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - p''} = 1 + 0,7 \cdot 0,044 = \underline{1,0308}$$

**Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva:**

$$O_{VZmin} = f \cdot O^S_{VZmin} = 1,0308 \cdot 3,6014 = \underline{3,7123\,m^3/kg}$$

**Objem $CO_2$ ve spalinách:**

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O^S_{VZmin}$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{37,36}{12,01} + 0,0003 \cdot 3,6014 = \underline{0,6873\,m^3/kg}$$

**Objem $SO_2$ ve spalinách:**

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,485}{32,06} = \underline{0,0033\ m^3/kg}$$

**Objem dusíku ve spalinách:**

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O^S_{VZmin}$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,275}{28,016} + 0,7805 \cdot 3,6014 = \underline{2,8131\ m^3/kg}$$

**Objem argonu ve spalinách:**

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O^S_{VZmin} = 0,0092 \cdot 3,6014 = \underline{0,0331\ m^3/kg}$$

**Minimální množství suchých spalin:**

$$O^S_{spmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar_2}$$

$$O^S_{spmin} = 0,6873 + 0,0033 + 2,8131 + 0,0331 = \underline{3,5368\ m^3/kg}$$

**Maximální množství $CO_2$ ve spalinách:**

$$(CO_2)_{max} = \frac{O_{CO_2}}{O^S_{spmin}} \cdot 100 = \frac{0,6873}{3,5368} \cdot 100 = \underline{19,4330\ \%}$$

**Minimální objem vodní páry:**

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^{\ r}}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^{\ r}}{18,016} + (f-1) \cdot O^S_{VZmin}$$

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,68}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{32,35}{18,016} + (1,308-1) \cdot 3,6014 = \underline{0,8419\ m^3/kg}$$

**Minimální množství vlhkých spalin:**

$$O_{spmin} = O^S_{spmin} + O_{H_20min} = 3,5368 + 0,8419 = \underline{4,3787\ m^3/kg}$$

## 3.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin

Pro zamezení nedokonalého spalování se zavádí spalování s vhodným přebytkem vzduchu. Při nedokonalém spalování vzniká oxid uhelnatý, reakce spotřebovává jen polovinu množství kyslíku a dodává jen třetinu možné energie. Naopak spalování s vyšším přebytkem vzduchu zvyšuje komínovou ztrátu. V našem případě je volen součinitel přebytku vzduchu 1,3.

**Množství vzduchu a spalin:**

$$O_{vz} = \beta \cdot O_{VZmin} = 1,3 \cdot 3,7123 = \underline{4,8269\ m^3/kg}$$

$$O_{sp} = O_{sp_{min}} + (1-\beta) \cdot O_{VZmin} = 4,3787 + (1-1,3) \cdot 3,7123 = \underline{5,4924\ m^3/kg}$$

**Skutečné množství vodní páry:**

$$O_{H_2O} = O_{H_2O_{min}} + (f - 1) \cdot (\beta - 1) \cdot O^S_{VZmin}$$

$$O_{H_2O} = 0{,}8419 + (1{,}0308 - 1) \cdot (1{,}3 - 1) \cdot 3{,}6014 = \underline{0{,}8752\ m^3/kg}$$

**Objemové části tříatomových plynů:**

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{sp}} = \frac{0{,}0033 + 0{,}6873}{5{,}4924} = \underline{0{,}1257}$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} = \frac{0{,}8752}{5{,}4924} = \underline{0{,}1593}$$

**Součet objemových částí tříatomových plynů:**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_20} = 0{,}1257 + 0{,}1593 = \underline{0{,}2851}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách:**

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{sp}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 4{,}705}{5{,}4924} \cdot \frac{50}{100} = \underline{4{,}2832\ g/m^3}$$

$X_p$ - procento popela v úletu, z tabulky $X_p = 50\%$

Střední hodnoty produktů spalování pro různé součinitele přebytku vzduchu jsou uvedeny v následující tabulce:

| $\beta$ | [-] | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $O_{VZ}$ | [$m^3$/kg] | 3,7123 | 4,0835 | 4,4547 | 4,8260 | 5,1972 | 5,5684 |
| $O_{SP}$ | [$m^3$/kg] | 4,3787 | 4,7500 | 5,1212 | 5,4924 | 5,8636 | 6,2349 |
| $O_{H2O}$ | [$m^3$/kg] | 0,8419 | 0,8530 | 0,8641 | 0,8752 | 0,8863 | 0,8974 |
| $r_{RO2}$ | [-] | 0,1577 | 0,1454 | 0,1349 | 0,1257 | 0,1178 | 0,1108 |
| $r_{H20}$ | [-] | 0,1923 | 0,1796 | 0,1687 | 0,1593 | 0,1511 | 0,1439 |
| $r_{SP}$ | [-] | 0,3500 | 0,3250 | 0,3036 | 0,2851 | 0,2689 | 0,2547 |
| $\mu$ | [g/$m^3$] | 5,3726 | 4,9527 | 4,5937 | 4,2832 | 4,0120 | 3,7731 |

***Tab. 3.2.1** – Střední hodnoty produktů spalování*

## 3.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva a entalpie minimálního množství vzduchu jsou vypočteny z hodnot uvedených v tabulce 3.3.1, výsledné entalpie jsou uvedeny v tabulce 3.3.2 pro různé teploty a různé přebytky vzduchu. Vzorový výpočet je pro teplotu 300°C a přebytek vzduchu 1,3.

**Entalpie minimálního množství vzduchu:**

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0{,}804}{1{,}293} \cdot 10^3 = (1{,}0308 - 1) \cdot \frac{0{,}804}{1{,}293} \cdot 10^3 = \underline{19{,}152\ g/kg}$$

$$c = c_s + 0{,}0016 \cdot d \cdot c_{H_20} = 1{,}317 + 0{,}0016 \cdot 19{,}152 \cdot 1{,}542 = \underline{1{,}364\ kJ/kgK}$$

$$I_{VZmin} = O^S_{VZmin} \cdot (ct)_{vz} = 3{,}6014 \cdot 1{,}364 \cdot 300 = \underline{1473{,}95\ kJ/kg}$$

$c$, $c_S$, $c_{H20}$ - měrná tepelná kapacita [kJ/kgK]

**Minimální entalpie spalin při α=1 a teplotě 300°C:**

$$I_{sp\,min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_20} \cdot i_{H_2O\,min} + O_{Ar} \cdot i_{Ar}$$

$$I_{sp\,min} = 0{,}6873 \cdot 559 + 0{,}0033 \cdot 610 + 2{,}8131 \cdot 392 + 0{,}8419 \cdot 463 + 0{,}0331 \cdot 278$$

$$I_{sp\,min} = \underline{1887{,}96\ \text{kJ/kg}}$$

**Entalpie spalin při teplotě 300°C a α=1,3:**

$$I_{sp} = I_{sp\,min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZmin} + I_p$$

$$I_{sp} = 1887{,}96 + (1{,}3 - 1) \cdot 1473{,}95 = \underline{2330{,}15\ \text{kJ/kg}}$$

Hodnota $I_p$ se neuvažuje, jelikož neplatí následující podmínka:

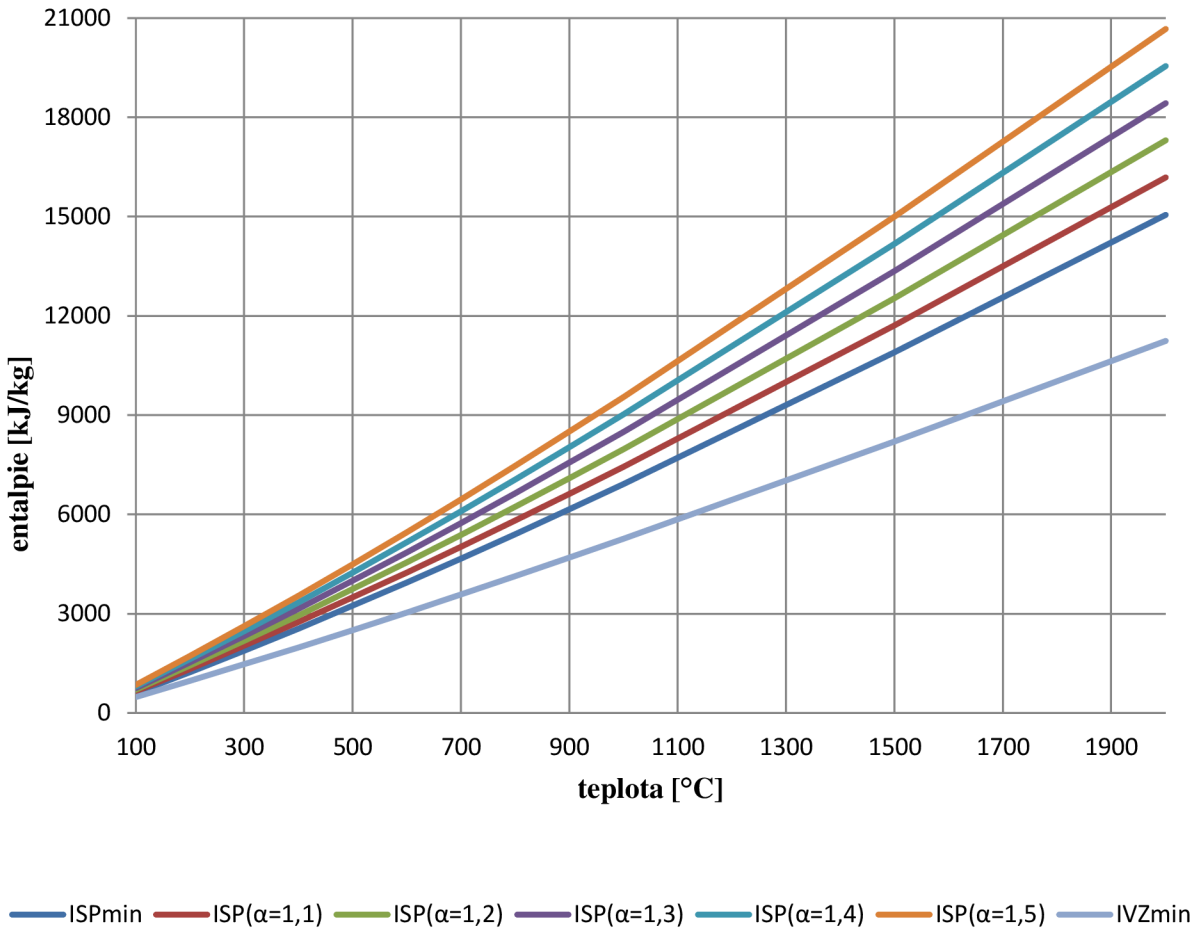
$$\frac{6 \cdot Q_i^r}{41{,}8 \cdot X_p} < A^r \qquad (40{,}19 < 4{,}705)$$

| teplota | entalpie složek spalin | | | | | měrné teplo | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t | $CO_2$ | $N_2$ | $H_20$ | $SO_2$ | Ar | $c_s$ | $c_{H20}$ |
| [°C] | [kJ/m³] | [kJ/m³] | [kJ/m³] | [kJ/m³] | [kJ/m³] | [kJ/m³K] | [kJ/m³K] |
| 100 | 170 | 130 | 150 | 189 | 93 | 1,300 | 1,505 |
| 200 | 357 | 260 | 304 | 392 | 186 | 1,307 | 1,522 |
| 300 | 559 | 392 | 463 | 610 | 278 | 1,317 | 1,542 |
| 400 | 772 | 527 | 626 | 836 | 372 | 1,329 | 1,565 |
| 500 | 994 | 666 | 795 | 1070 | 465 | 1,343 | 1,590 |
| 600 | 1225 | 804 | 969 | 1310 | 557 | 1,356 | 1,615 |
| 700 | 1462 | 948 | 1149 | 1550 | 650 | 1,371 | 1,641 |
| 800 | 1705 | 1094 | 1334 | 1800 | 743 | 1,384 | 1,688 |
| 900 | 1952 | 1242 | 1526 | 2050 | 834 | 1,398 | 1,696 |
| 1000 | 2204 | 1392 | 1723 | 2305 | 928 | 1,410 | 1,723 |
| 1500 | 3504 | 2166 | 2779 | 3590 | 1390 | 1,462 | 1,853 |
| 2000 | 4844 | 2965 | 3926 | 4890 | 1855 | 1,500 | 1,963 |

***Tab. 3.3.1*** *– Entalpie složek spalin a měrné teplo*

| t | $I_{SPmin}$ | $I_{VZmin}$ | $I_{SP}(\alpha=1)$ | $I_{SP}(\alpha=1,1)$ | $I_{SP}(\alpha=1,2)$ | $I_{SP}(\alpha=1,3)$ | $I_{SP}(\alpha=1,4)$ | $I_{SP}(\alpha=1,5)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [°C] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [kJ/kg] |
| 100 | 612,53 | 484,79 | 612,53 | 661,01 | 709,49 | 757,97 | 806,45 | 854,93 |
| 200 | 1240,17 | 974,99 | 1240,17 | 1337,67 | 1435,16 | 1532,66 | 1630,16 | 1727,66 |
| 300 | 1887,96 | 1473,95 | 1887,96 | 2035,36 | 2182,75 | 2330,15 | 2477,54 | 2624,94 |
| 400 | 2555,22 | 1983,57 | 2555,22 | 2753,57 | 2951,93 | 3150,29 | 3348,64 | 3547,00 |
| 500 | 3244,95 | 2506,05 | 3244,95 | 3495,56 | 3746,16 | 3996,77 | 4247,37 | 4497,98 |
| 600 | 3942,26 | 3037,00 | 3942,26 | 4245,96 | 4549,66 | 4853,36 | 5157,06 | 5460,76 |
| 700 | 4665,65 | 3582,99 | 4665,65 | 5023,95 | 5382,25 | 5740,55 | 6098,85 | 6457,15 |
| 800 | 5403,04 | 4136,45 | 5403,04 | 5816,68 | 6230,33 | 6643,98 | 7057,62 | 7471,27 |
| 900 | 6154,63 | 4699,68 | 6154,63 | 6624,60 | 7094,56 | 7564,53 | 8034,50 | 8504,47 |
| 1000 | 6919,60 | 5268,07 | 6919,60 | 7446,41 | 7973,22 | 8500,02 | 9026,83 | 9553,64 |
| 1500 | 10899,04 | 8204,52 | 10899,04 | 11719,49 | 12539,94 | 13360,39 | 14180,85 | 15001,30 |
| 2000 | 15053,05 | 11237,35 | 15053,05 | 16176,78 | 17300,52 | 18424,25 | 19547,99 | 20671,72 |

***Tab. 3.3.2*** *– Entalpie spalin a vzduchu*




***Obr. 3.3.1*** *– I-t diagram vzduchu a spalin*

# 4 Tepelná bilance kotle

## 4.1 Teplo přivedené do kotle

**Fyzické teplo paliva:**

Fyzické palivo se počítá v případě, že se palivo předehřívá mimo kotel. V případě, že palivo není předehříváno cizím zdrojem, se fyzické teplo uvažuje jen u paliv, které splňují následující podmínku:

$$W_t^r \geq \frac{Q_i^r}{4{,}19} \cdot \frac{1}{150} \qquad (32{,}35 \geq 22{,}28)$$

Podmínka je splněna, proto se teplota paliva bere $t_p$=20°C. Dále se určí hodnota měrného tuhého paliva, z následujícího vztahu.

$$c_p = c_w \cdot \frac{w_t^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - w_t^r}{100} = 4{,}19 \cdot \frac{32{,}35}{100} + 1{,}2 \cdot \frac{100 - 32{,}35}{100} = \underline{2{,}1673\ \text{kJ/kgK}}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $c_w$ | - | měrné teplo vody, | $c_w = 4{,}19$ kJ/kgK |
| $c_{su}$ | - | měrné teplo sušiny paliva, | $c_{su} = 1{,}2$ kJ/kgK |

Potom se fyzické teplo paliva určí:

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2{,}1673 \cdot 20 = \underline{43{,}35\ \text{kJ/kg}}$$

**Teplo přivedené do kotle:**

$$Q_p^p = O_r^i + i_p = 14 \cdot 1000 + 43{,}35 = \underline{14043{,}35\ \text{kJ/kg}}$$

## 4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelná účinnost se stanovuje pomocí častější nepřímé metody, kdy je určena pomocí ztrát kotle. Rozlišujeme několik ztrát kotle:

- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- ztráta citelným teplem tuhých zbytků
- ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)
- ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)
- ztráta sdílením tepla do okolí

**Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal):**

Určí se součtem jednotlivých ztrát hořlavinou v tuhých zbytcích, které jsou způsobeny obsahem popílku ve spalinách (ú) a roštovým propadem (r). Uvažuji návrat tuhých zbytků z výsypek mezi 2. a 3. tahem, a 4. a 5. tahem.

$$\xi_{MN\,ú} = \frac{c_ú}{100 - c_ú} \cdot \frac{X_ú}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{40}{100} \cdot \frac{4{,}705}{14043{,}35} \cdot 32600 = \underline{1{,}456\ \%}$$

$$\xi_{MN\,r} = \frac{c_r}{100 - c_r} \cdot \frac{X_r}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c = \frac{5}{100 - 5} \cdot \frac{60}{100} \cdot \frac{4{,}705}{14043{,}35} \cdot 32600 = \underline{0{,}345\ \%}$$

$$\xi_{MN} = \xi_{MN\,ú} + \xi_{MN\,r} = 1{,}456 + 0{,}345 = \underline{1{,}801\ \%}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $Q_c$ | - | výhřevnost uhlíku | $Q_c$ = 32600 kJ/kg |
| $c_i$ | - | obsah uhlíku v druhu tuhých zbytků | [-] |
| $X_i$ | - | poměr hmotnosti popela v druhu tuhých zbytků | [-] |

**Ztráta citelným teplem tuhých zbytků:**

Je způsobena nevyužitým teplem, které odchází propadem přes rošt a popílkem v úletu.

$$\xi_{fi\,ú} = \frac{X_ú}{100 - c_ú} \cdot \frac{\cdot A^r}{Q_p^p} \cdot \bar{c}_ú \cdot t_ú = \frac{40}{100 - 25} \cdot \frac{\cdot 4{,}705}{14043{,}35} \cdot 0{,}823 \cdot 140 = \underline{0{,}021\ \%}$$

$$\xi_{fi\,r} = \frac{X_r}{100 - c_r} \cdot \frac{\cdot A^r}{Q_p^p} \cdot \bar{c}_r \cdot t_r = \frac{60}{100 - 5} \cdot \frac{\cdot 4{,}705}{14043{,}35} \cdot 0{,}9 \cdot 400 = \underline{0{,}076\ \%}$$

$$\xi_{fi} = \xi_{fi\,ú} + \xi_{fi\,r} = 0{,}021 + 0{,}076 = \underline{0{,}097\ \%}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $t_i$ | - | teplota tuhých zbytků | [°C] |
| $\bar{c}_i$ | - | měrné teplo tuhých zbytků | [kJ/kgK] |

**Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal):**

Určí se ze stanovených empirických hodnot. Je způsobena chemickou nedokonalostí spalování, kdy ve spalinách zůstávají podíly spalitelných plynů. Pro náš případ je voleno:

$$\xi_{CN} = \underline{0{,}275\,\%}$$

**Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta):**

Jedná se o největší podíl na ztrátách kotle. Část nevyužitelného tepla vzniklého při spalování je odnášena do komína.

$$\xi_k = (100 - \xi_{MN}) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (\vartheta_k - t_{vz})}{Q_p^p}$$

$$\xi_k = (100 - 1{,}801) \cdot \frac{5{,}4924 \cdot 1{,}392 \cdot (140 - 20)}{14043{,}35} = \underline{6{,}414\,\%}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $t_{vz}$ | - | teplota vztažného vzduchu, | $t_{vz} = 20°C$ |
| $\vartheta_k$ | - | teplota spalin za kotlem, | $\vartheta_k = 140°C$ |

**Ztráta sdílením tepla do okolí:**

Určuje se podle závislosti na parním výkonu kotle a druhu nátěru oplechování. Se zvyšujícím výkonem tato ztráta klesá. Na základě diagramu [1] je voleno:

$$\xi_{SV} = \underline{1{,}18\,\%}$$

**Tepelná účinnost kotle:**

$$\eta_k = 100 - \Sigma\xi_i = 100 - (\xi_{MN} + \xi_{fi} + \xi_{CN} + \xi_k + \xi_{SV})$$

$$\eta_k = 100 - (1{,}801 + 0{,}097 + 0{,}275 + 6{,}414 + 1{,}18) = \underline{90{,}233\,\%}$$

## 4.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

**Výrobní teplo páry:**

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 8{,}333 \cdot (3317{,}03 - 440{,}21) = 23973{,}49\ \text{kJ/s} = \underline{23{,}973\ \text{MW}}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $M_{pp}$ | - | parní výkon kotle | [kg/s] |
| $i_{pp}$ | - | entalpie přehřáté páry pro 5 MPa, 450°C | [kJ/kg] |
| $i_{nv}$ | - | entalpie napájecí vody pro 105°C | [kJ/kg] |

**Množství paliva přivedeného do kotle:**

$$M_{pp} = \frac{Q_V}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{23973{,}49}{14043{,}35 \cdot \frac{90{,}244}{100}} = \underline{1{,}892\ \text{kg/s}}$$

**Skutečně spálené množství paliva (výpočtové):**

$$M_{pv} = M_{pp} \cdot \left(1 - \frac{\xi_{MN}}{100}\right) = 1{,}892 \cdot \left(1 - \frac{1{,}801}{100}\right) = \underline{1{,}858\ \text{kg/s}}$$

# 5 Výpočet spalovací komory

Nejdříve je potřeba navrhnout rozměry spalovací komory. Jsou odvozené od plošného zatížení ohniště, které je voleno $q_s$ = 2000 kW/m$^2$ dle doporučení.

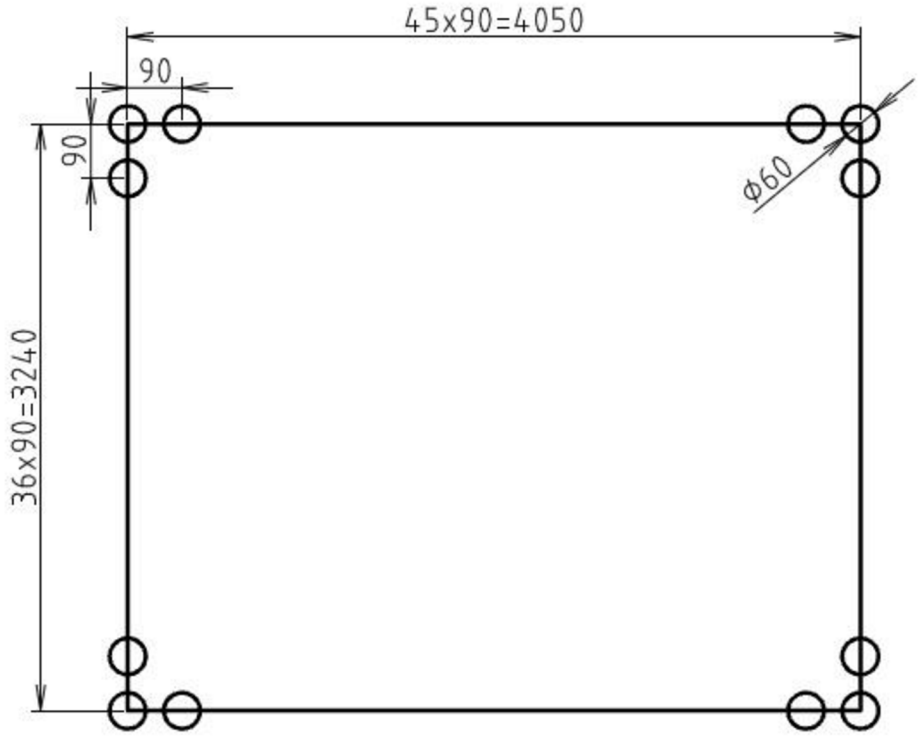
$$q_s = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{S} \Rightarrow \qquad S = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{q_s} = \frac{1{,}858 \cdot 14 \cdot 10^3}{2000} = \underline{13{,}005\,\mathrm{m}^2}$$

**Rozměry spalovací komory:**

Šířka a hloubka spalovací komory jsou určeny z vypočteného průřezu S spalovací komory tak, aby bylo možné membránovou stěnu svařit z výparníkových trubek o vnějším průměru 60 mm a praporků 30 mm. Výška spalovací komory se volí na základě tepelného výpočtu. Výstupní teplota z ohniště se má pohybovat kolem 850 ºC.

- Šířka spalovací komory : a = 3,24 m
- Hloubka spalovací komory: b = 4,05 m
- Výška spalovací komory: c = 13,5 m

**Schéma spalovací komory:**




***Obr. 5.1** –Schéma spalovací komory*

**Projekční povrch stěn včetně výstupního průřezu**

$$F_{st} = [2 \cdot (a \cdot c) + 2 \cdot (b \cdot c) + 2 \cdot (a \cdot b)]$$

$$F_{st} = [2 \cdot (3{,}24 \cdot 13{,}5) + 2 \cdot (4{,}05 \cdot 13{,}5) + 2 \cdot (3{,}24 \cdot 4{,}05)] = \underline{223{,}074\,\mathrm{m}^2}$$

**Účinná sálavá plocha stěn ohniště**

$$F_{ús} = [2 \cdot (a \cdot c) + 2 \cdot (b \cdot c) + (a \cdot b)] \cdot x_{st}$$

$$F_{ús} = [2 \cdot (3{,}24 \cdot 13{,}5) + 2 \cdot (4{,}05 \cdot 13{,}5) + (3{,}24 \cdot 4{,}05)] \cdot 0{,}95 = \underline{199{,}454\ m^2}$$

$F_{st}$ - plocha otrubkované stěny včetně výstupního otvoru
$x_{st}$ - úhlový součinitel trubkové stěny $x_{st} = 0{,}95$

**Aktivní objem ohniště**

$$V_0 = a \cdot b \cdot c = 3{,}24 \cdot 4{,}05 \cdot 13{,}5 = \underline{177{,}147\ m^3}$$

## 5.1 Výpočet ohniště z hlediska přenosu tepla

Cílem tepelného výpočtu je určení střední teploty odchozích spalin. Přenos tepla se uskutečňuje především sáláním, proto se konvekce obvykle zanedbává. Vychází se z teoretické adiabatické spalovací teploty, která neuvažuje odváděné teplo.

### 5.1.1 Určení adiabatické teploty v ohništi

**Teplo dodané vzduchem**

$$Q_{vz} = O_{vz} \cdot M_{pv} \cdot I_{vz} = 4{,}826 \cdot 1{,}858 \cdot 40{,}26 = \underline{360{,}961\ kW}$$

$$I_{vz} = c \cdot t = 1{,}323 \cdot 30 = \underline{40{,}26\ kJ/m^3}$$

c - měrné teplo vlhkého vzduchu při teplotě nasávaného vzduchu

**Teplo vzniklé spálením paliva**

$$Q_p = M_{pv} \cdot Q_i^r = 1{,}858 \cdot 14 \cdot 10^3 = \underline{26009{,}355\ kW}$$

**Entalpie spalin ve spalovací komoře**

$$I_{sp} = \frac{Q_{vz} + Q_p}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{360{,}961 + 26009{,}355}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{2584{,}346\ kJ/m^3}$$

**Podíly složek celkových spalin**

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{sp}} = \frac{2{,}813}{5{,}492} = \underline{0{,}5122}$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} = \frac{0{,}8752}{5{,}492} = \underline{0{,}1593}$$

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp}} = \frac{0{,}6873}{5{,}492} = \underline{0{,}1251}$$

$$\omega_{Ar} = \frac{O_{Ar}}{O_{sp}} = \frac{0{,}0331}{5{,}492} = \underline{0{,}0060}$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{sp}} = \frac{0{,}0033}{5{,}492} = \underline{0{,}0006}$$

$$\omega_{vz} = \frac{(\alpha - 1) \cdot O_{vz_{min}}}{O_{sp}} = \frac{(1{,}3 - 1) \cdot 3{,}712}{5{,}492} = \underline{0{,}2028}$$

**Entalpie spalin pro 1500°C**

$$I_{sp}^{1500} = \Sigma\omega_i \cdot i_i = \omega_{N_2} \cdot i_{N_2} + \omega_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + \omega_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + \omega_{Ar} \cdot i_{Ar} + \omega_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + \omega_{vz} \cdot c_p \cdot t$$

$$I_{sp}^{1500} = 0{,}5122 \cdot 2166 + 0{,}1593 \cdot 2779 + 0{,}1251 \cdot 3504 + 0{,}0060 \cdot 1390 + 0{,}0006 \cdot 3590 +$$

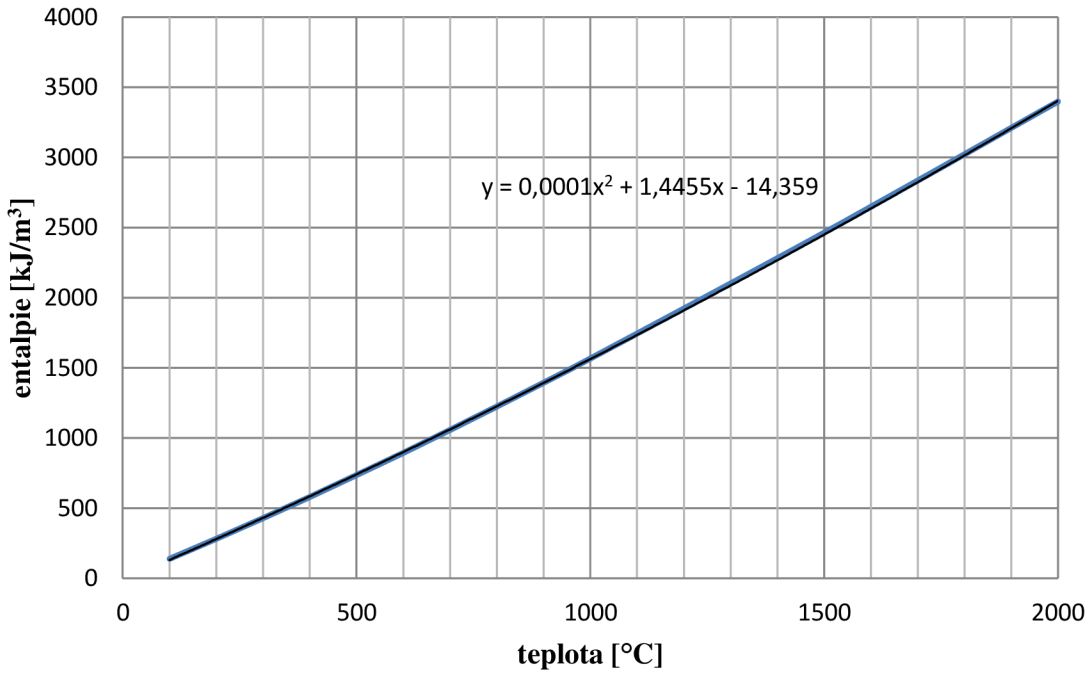
$$+ 0{,}2028 \cdot 1{,}519 \cdot 1500 = \underline{2463{,}16\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

**Entalpie spalin pro 2000°C**

$$I_{sp}^{2000} = \Sigma\omega_i \cdot i_i = \omega_{N_2} \cdot i_{N_2} + \omega_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + \omega_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + \omega_{Ar} \cdot i_{Ar} + \omega_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + \omega_{vz} \cdot c_p \cdot t$$

$$I_{sp}^{2000} = 0{,}5122 \cdot 2965 + 0{,}1593 \cdot 3926 + 0{,}1251 \cdot 4844 + 0{,}0060 \cdot 1855 + 0{,}0006 \cdot 4890 +$$

$$+ 0{,}2028 \cdot 1{,}560 \cdot 2000 = \underline{3397{,}184\ \mathrm{kJ/m^3}}$$




***Obr. 5.1.1*** *– I-t diagram spalin*

Z vypočtené entalpie spalin ve spalovací komoře $I_{sp}$ se pomocí interpolace určí adiabatická teplota ve spalovací komoře z entalpií pro teploty 1500ºC a 2000ºC, nebo se určí z grafu 5.1.1, kde je možné adiabatickou teplotu vypočíst pomocí spojnice trendu.

Adiabatická teplota ve spalovací komoře je **1564,87°C**.

### 5.1.2 Poměrná teplota spalin

$$\Theta_0 = \frac{\vartheta_0}{\vartheta_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\vartheta_0$ | absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště | [K] |
| $\vartheta_a$ | teoretická teplota při adiabatickém spalování | [K] |

**Teplota spalin na výstupu z ohniště**

Teoretická teplota $\vartheta_a$ [ºC] se určí z užitečného tepla uvolněného při spalování $I_u$ [kJ/kg], které se rovná entalpii spalin při teplotě teoretické a součiniteli přebytku vzduchu na konci ohniště $\alpha_0$.

Nejprve je nutné zvolit teplotu $\vartheta_0$ [ºC] potřebnou pro předběžný výpočet dále uvedených veličin. Tato teplota byla zvolena $\vartheta_0$ = 850ºC. Po té se dopočte skutečná teplota spalin na výstupu z ohniště. Tyto dvě teploty by se neměly lišit o více jak 50 ºC, v opačném případě je potřeba zvolit jinou vstupní teplotu nebo upravit výšku spalovací komory. V mém případě je rozdíl těchto teplot 5,1 ºC, podmínka je splněna.

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 273{,}15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273{,}15 = \frac{1564{,}87 + 273{,}15}{1 + 0{,}59 \cdot \left(\frac{0{,}6922}{0{,}6220}\right)^{0,6}} - 273{,}15 = \underline{855{,}10°C}$$

Teplotě 855,10 ºC odpovídá entalpie **7151,19 kJ/kg** podle tabulky 3.3.2.

### 5.1.3 Součinitel M

Závisí na poloze maximální teploty plamene $x_{pl}$, která se odvozuje od umístění hořáků, a na druhu spalovaného paliva. Pro spalování paliva na roštu je hodnota $x_{pl} = 0$.

$$M = 0{,}59 - 0{,}5 \cdot x_{pl} = 0{,}59 - 0{,}5 \cdot 0 = \underline{0{,}59}$$

### 5.1.4 Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot C}}{5{,}7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot F_{st} \cdot Ta^3} = \frac{0{,}9871 \cdot 1{,}858 \cdot 11{,}449}{5{,}7 \cdot 10^{-11} \cdot 0{,}4275 \cdot 223{,}074 \cdot 1838{,}02^3} = \underline{0{,}6220}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varphi$ | součinitel uchování tepla | |
| $M_{pv}$ | množství paliva skutečně spáleného | |
| $\overline{O_{sp} \cdot C}$ | střední celkové měrné teplo spalin uchování tepla | |
| $5{,}7 \cdot 10^{-11}$ | Boltzmannova konstanta sálání absolutně černého tělesa | |
| $\overline{\psi}$ | střední hodnota součinitele tepelné vodivosti stěn | |
| $F_{st}$ | celkový povrch stěn ohniště | |
| Ta | teoretická teplota plamene | [K] |

**Součinitel uchování tepla**

$$\varphi = 1 - \frac{\xi_{sv}}{\eta_k + \xi_{sv}} = 1 - \frac{1{,}18}{90{,}24 + 1{,}18} = \underline{0{,}9871}$$

| | |
|---|---|
| $\xi_{sv}$ | ztráta sáláním do okolí |
| $\eta_k$ | účinnost kotle |

**Střední celkové měrné teplo spalin**

$$\overline{O_{sp} \cdot C} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{14184{,}47 - 6000}{1564{,}87 - 850} = \underline{11{,}449\ \text{kJ/kgK}}$$

| | |
|---|---|
| $I_u$ | užitečné teplo uvolněné v ohništi |
| $I_0$ | entalpie spalin na výstupu z ohniště |
| $\vartheta_a$ | adiabatická teplota plamene |
| $\vartheta_0$ | teplota spalin na výstupu z ohniště |

**Užitečné teplo uvolněné v ohništi**

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - \xi_{MN} - \xi_{CN} - \xi_{fi}}{100 - \xi_{MN}} + Q_{vz} = 14043{,}35 \cdot \frac{100 - 1{,}80 - 0{,}275 - 0{,}096}{100 - 1{,}80} + 194{,}29$$

$$I_u = \underline{14184{,}47\ \text{kJ/kg}}$$

| | |
|---|---|
| $\xi_{MN}$ | ztráta mechanickým nedopalem |
| $\xi_{CN}$ | ztráta chemickým nedopalem |
| $\xi_{fi}$ | ztráta citelným teplem tuhých zbytků |
| $Q_{vz}$ | teplo přivedené do kotle se vzduchem |
| $Q_p^p$ | teplo přivedené do kotle |

**Teplo přivedené do kotle se vzduchem**

$$Q_{vz} = \frac{361{,}55}{M_{pv}} = \frac{361{,}55}{1{,}86} = \underline{194{,}29\ \text{kJ/kg}}$$

**Součinitel tepelné efektivnosti stěn**

$$\overline{\psi} = x \cdot \xi = 0{,}95 \cdot 0{,}45 = \underline{0{,}4275}$$

| | |
|---|---|
| x | úhlový součinitel |
| $\xi$ | součinitel zanesení stěn ohniště |

### 5.1.5 Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \overline{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R}{F_{st}}\right)} = \frac{0{,}4583 + (1 - 0{,}4583) \cdot \frac{13{,}12}{223{,}07}}{1 - (1 - 0{,}4583) \cdot (1 - 0{,}4275) \cdot \left(1 - \frac{13{,}12}{223{,}07}\right)}$$

$$a_0 = \underline{0{,}6922}$$

| | |
|---|---|
| $a_{pl}$ | efektivní stupeň černosti |
| R | plocha hořící vrstvy paliva na roštu |
| $F_{st}$ | celkový povrch stěn ohniště |
| $\overline{\psi}$ | střední hodnota součinitele tepelné vodivosti stěn |

**Plocha hořící vrstvy paliva na roštu**

$$R = a \cdot b = 3{,}24 \cdot 4{,}05 = \underline{13{,}12\ \text{m}^2}$$

**Efektivní stupeň černosti plamene**

$$a_{pl} = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-2{,}1167 \cdot 0{,}1013 \cdot 2{,}8588} = \underline{0{,}4583}$$

| | |
|---|---|
| k | součinitel zeslabení sálání |
| p | tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaků se bere p = 0,1 MPa |
| s | účinná tloušťka sálavé vrstvy |

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{177{,}147}{223{,}074} = \underline{2{,}8588\,\mathrm{m}}$$

$V_0$ aktivní objem ohniště
$F_{st}$ celkový povrch stěn ohniště

**Součinitel zeslabení sálání**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2$$

$$k = 1{,}7353 + 0{,}2313 + 10 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}03 = \underline{2{,}1167\,\mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

$k_k$ součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi, $k_k = 1$
$\chi_1$ hodnota závislá na druhu paliva, $\chi_1 = 0{,}5$
$\chi_2$ hodnota závislá na způsobu spalování, $\chi_2 = 0{,}03$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{850^2 \cdot 20^2}} \cdot 4{,}2832 = \underline{0{,}2313\,\mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

$\mu$ střední hmotová koncentrace popílku ve spalinách
$d$ střední efektivní průměr částeček popílku, $d = 20\ \mu\mathrm{m}$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0288 \cdot 2{,}8588}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{850 + 273{,}15}{1000} \right) \cdot 0{,}2851$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \underline{1{,}7353\,\mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

$r_{sp}$ objemová část tříatomových plynů
$T_0$ teplota na konci ohniště
$s$ účinná tloušťka sálavé vrstvy
$p_{sp}$ celkový parciální tlak

## 5.2 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0{,}9870 \cdot (14184{,}47 - 7157{,}19) = \underline{6942{,}492\,\mathrm{kJ/kg}}$$

$\varphi$ součinitel uchování tepla
$I_u$ teplo uvolněné ve spalovací komoře
$I_0$ entalpie spalin na výstupu z ohniště (pro 855,10 °C)

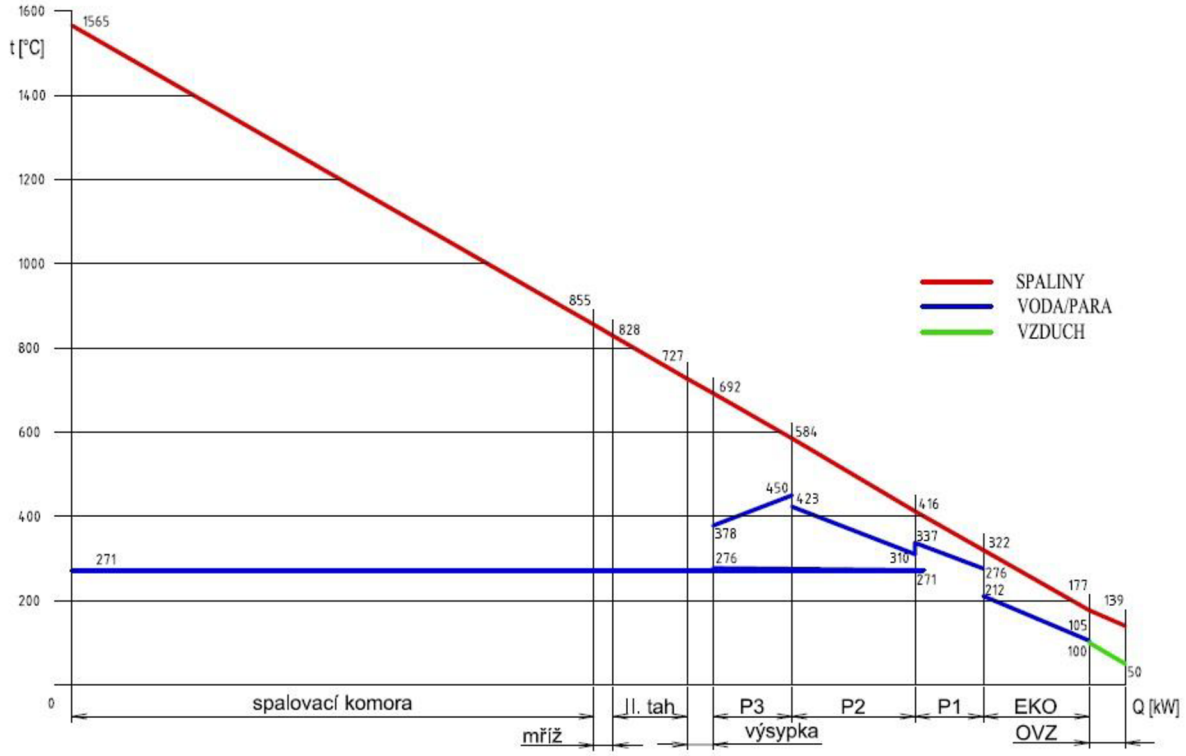
**Střední tepelné zatížení stěn ohniště**

$$\bar{q} = \frac{Q_s \cdot M_{pv}}{F_{ús}} = \frac{6942{,}492 \cdot 1{,}858}{199{,}45} = \underline{64{,}666\ \mathrm{kW/m^2}}$$

$M_{pv}$ množství paliva skutečně spáleného
$F_{ús}$ účinná sálavá plocha stěn ohniště

# 6 Výpočet teplosměnných ploch

Na základě požadavků pro páru, vodu se navrhnou teplosměnné plochy kotle. Výpočtové parametry jsou teplota, tlak, entalpie. Pro tento výpočet je použit program X Steam [6]. Po výpočtu je možné sestavit pilový diagram.




***Obr. 6.1*** *– Pilový diagram (Q-t diagram)*

**Tlakové ztráty jednotlivých teplosměnných ploch:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Požadovaný tlak přehřáté páry | $p_{p3out}$ | [MPa] | 5 |
| Tlaková ztráta v přehříváku 3 | $\Delta p_{p3}$ | [MPa] | 0,2 |
| Tlaková ztráta v přehříváku 2 | $\Delta p_{p2}$ | [MPa] | 0,2 |
| Tlaková ztráta v přehříváku 1 | $\Delta p_{p1}$ | [MPa] | 0,2 |
| Tlaková ztráta v závěsných trubkách | $\Delta p_{zt}$ | [MPa] | 0,05 |
| Tlaková ztráta ve výparníku | $\Delta p_{výp}$ | [MPa] | 0 |
| Tlaková ztráta v ekonomizéru | $\Delta p_{eko}$ | [MPa] | 0,4 |
| Tlak napájecí vody | $p_{nv}$ | [MPa] | 6,05 |

***Tab. 6.1*** *– Tlakové ztráty*

## 6.1 Napájecí voda

Pro návrh napájecího čerpadla je nutné dopočíst tlak napájecí vody, který se určí na základě tlakových ztrát jednotlivých ploch.

**Tlak napájecí vody**

$$p_{nv} = p_{p3out} + \Delta p_{p3} + \Delta p_{p2} + \Delta p_{p1} + \Delta p_{zt} + \Delta p_{výp} + \Delta p_{eko}$$

$$p_{nv} = 5 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}05 + 0 + 0{,}4 = \underline{6{,}05\,MPa}$$

**Teplota napájecí vody**

$$t_{nv} = \underline{105\,°C}$$

**Entalpie napájecí vody**

$$i_{nv} = f\,(p_{nv}; t_{nv}) = \underline{444{,}60\,kJ/kg}$$

## 6.2 Přehřívák 3

Pro návrh přehříváku 3 jako jednu maximální teplosměnnou plochu uvažuji entalpický spád $\Delta i_{p3}$ = 180 kJ/kg.

**Tlak páry na výstupu**

$$p_{p3out} = \underline{5\,MPa}$$

**Teplota páry na výstupu**

$$t_{p3out} = \underline{450\,°C}$$

**Entalpie páry na výstupu**

$$i_{p3out} = f\,(p_{p3out}; t_{p3out}) = \underline{3317{,}03\,kJ/kg}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{p3in} = \underline{5{,}2\,MPa}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{p3in} = i_{p3out} - \Delta i_{p3} = 3317{,}03 - 180 = \underline{3137{,}03\,kJ/kg}$$

**Teplota páry na vstupu**

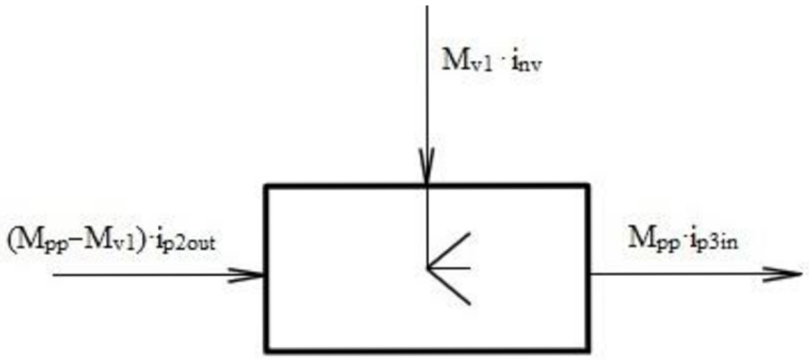
$$t_{p3in} = f\,(p_{p3in}; i_{p3in}) = \underline{377{,}76\,°C}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{p3} = M_{pp} \cdot \Delta i_{p3} = 8{,}33 \cdot 180 = \underline{1500\,kW}$$

## 6.3 Přehřívák 2

Přehřívák 2 byl navrhnut jako dvě maximální teplosměnné plochy, proto entalpický spád uvažuji $\Delta i_{p2}$ = 306 kJ/kg. Dále je mezi přehřívákem 3 a 2 umístěna regulace teploty přehřáté páry vstřikem napájecí vody, který uvažuji 4 % z celkového množství přehřáté páry.




***Obr. 6.3.1*** *– Vstřik napájecí vody mezi P3 a P2*

**Tlak páry na výstupu**

$$p_{p2out} = \underline{5{,}2\,\mathrm{MPa}}$$

**Entalpie páry na výstupu**

**Množství vstřiku napájecí vody**

$$M_{v1} = 0{,}04 \cdot M_{pp} = 0{,}04 \cdot 8{,}33 = \underline{0{,}33\,\mathrm{kg/s}}$$

**Bilanční rovnice**

$$(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2out} + M_{v1} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{p3in}$$

$$i_{p2out} = \frac{M_{pp} \cdot i_{p3in} - M_{v1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1}} = \frac{8{,}33 \cdot 3137{,}03 - 0{,}33 \cdot 444{,}60}{8{,}33 - 0{,}33} = \underline{3249{,}22\,\mathrm{kJ/kg}}$$

**Teplota páry na výstupu**

$$t_{p2out} = f\,(p_{p2out}; i_{p2out}) = \underline{422{,}96\,°\mathrm{C}}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{p2in} = \underline{5{,}4\,\mathrm{MPa}}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{p2in} = i_{p2out} - \Delta i_{p2} = 3249{,}22 - 306 = \underline{2943{,}22\,\mathrm{kJ/kg}}$$

**Teplota páry na vstupu**

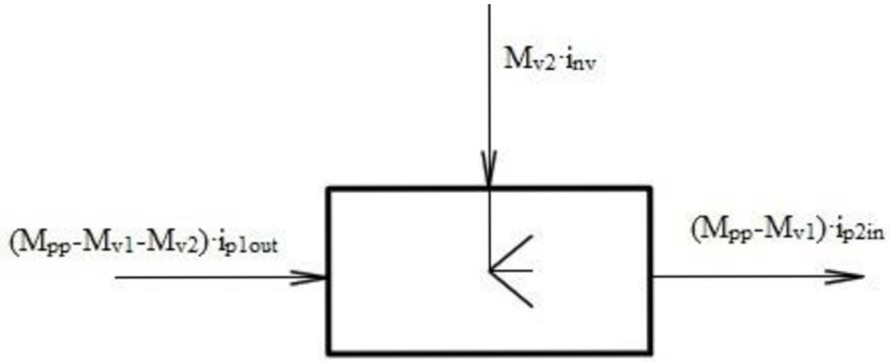
$$t_{p2in} = f\,(p_{p2in}; i_{p2in}) = \underline{310{,}19\,°\mathrm{C}}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{p2} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot \Delta i_{p2} = (8{,}33 - 0{,}33) \cdot 306 = \underline{2365\,\mathrm{kW}}$$

## 6.4 Přehřívák 1

Mezi přehřívákem 2 a 1 je umístěna regulace teploty přehřáté páry vstřikem napájecí vody, který uvažuji 3 % z celkového množství přehřáté páry.




***Obr. 6.4.1*** *– Vstřik napájecí vody mezi P2 a P1*

**Tlak páry na výstupu**

$$p_{p1out} = \underline{5{,}4\,\mathrm{MPa}}$$

**Entalpie páry na výstupu**

**Množství vstřiku napájecí vody**

$$M_{v2} = 0{,}03 \cdot M_{pp} = 0{,}03 \cdot 8{,}33 = \underline{0{,}25\,\mathrm{kg/s}}$$

**Bilanční rovnice**

$$(M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot i_{p1out} + M_{v2} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2in}$$

$$i_{p1out} = \frac{(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2in} - M_{v2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}} = \frac{(8{,}33 - 0{,}33) \cdot 2943{,}22 - 0{,}25 \cdot 444{,}60}{8{,}33 - 0{,}33 - 0{,}25}$$

$$i_{p1out} = \underline{3023{,}82\,\mathrm{kJ/kg}}$$

**Teplota páry na výstupu**

$$t_{p1out} = f\,(p_{p1out}; i_{p1out}) = \underline{337{,}25\,°\mathrm{C}}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{p1in} = \underline{5{,}6\,\mathrm{MPa}}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{p1in} = i_{zt} = \underline{2811{,}82\,\mathrm{kJ/kg}}$$

**Teplota páry na vstupu**

$$t_{p1in} = t_{zt} = \underline{276{,}26\,°\mathrm{C}}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{p1} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{p1} = (8{,}33 - 0{,}33 - 0{,}25) \cdot 212 = \underline{1643\,\mathrm{kW}}$$

## 6.5 Závěsné trubky

Závěsné trubky jsou umístěny ve III. tahu za účelem podpory zavěšení trubkových svazků přehříváků. Jsou napájené z bubnu sytou parou, pára dále vstupuje do přehříváku 1. Teplotní spád závěsných trubek se má pohybovat kolem 5 ºC.

**Tlak páry na výstupu**

$$p_{ZTout} = \underline{5{,}6\,MPa}$$

**Teplota páry na výstupu**

$$t_{ZTout} = t_{výp} + 4{,}56 = \underline{276{,}26\,°C}$$

**Entalpie páry na výstupu**

$$i_{ZTout} = f\,(p_{ZTout}; t_{ZTout}) = \underline{2811{,}82\,kJ/kg}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{ZTin} = \underline{5{,}65\,MPa}$$

**Teplota páry na vstupu**

$$t_{ZTin} = t_{výp} = \underline{271{,}69\,°C}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{ZTin} = i_{VÝPout} = \underline{2788{,}24\,kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{ZT} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{ZT} = (8{,}33 - 0{,}33 - 0{,}25) \cdot 23{,}58 = \underline{182{,}76\,kW}$$

## 6.6 Výparník

Výparník je tvořen membránovými stěnami v I, II. a III. tahu, membránovými stěnami u výsypky mezi II a III tahem, dále mříží na výstupu ze spalovací komory. Probíhá zde fázová přeměna ze syté kapaliny na sytou páru. Teplota ani tlak se v tomto případě nemění.

**Tlak páry na vstupu a výstupu**

$$p_{výp} = \underline{5{,}65\,MPa}$$

**Teplota páry na vstupu a výstupu**

$$t_{výp} = f\,(p_{výp}) = \underline{271{,}69\,°C}$$

**Entalpie syté páry na výstupu**

$$i''_{výp} = f\,(p_{výp}) = \underline{2788{,}24\,kJ/kg}$$

**Entalpie syté kapaliny na vstupu**

$$i'_{výp} = f\,(p_{výp}) = \underline{1193{,}72\,kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{výp} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{výp} = (8{,}33 - 0{,}33 - 0{,}25) \cdot 1594{,}51 = \underline{12357{,}46\,kW}$$

## 6.7 Ekonomizér

V ekonomizéru dochází k ohřátí napájecí vody před vstupem do výparníku. Navrhovaný nedohřev vody oproti teplotě ve výparníku je 60 ºC.

**Tlak vody na výstupu**

$$p_{EKOout} = \underline{5{,}65\,MPa}$$

**Teplota vody na výstupu**

$$t_{EKOout} = t_{výp} - 60 = \underline{211{,}69\,°C}$$

**Entalpie vody na výstupu**

$$i_{EKOout} = f\,(p_{EKOout}; t_{EKOout}) = \underline{906{,}63\,kJ/kg}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{EKOin} = \underline{6{,}05\,MPa}$$

**Teplota páry na vstupu**

$$t_{EKOin} = \underline{105\,°C}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{EKOin} = f\,(p_{EKOin}; t_{EKOin}) = \underline{444{,}60\,kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{EKO} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{EKO} = (8{,}33 - 0{,}33 - 0{,}25) \cdot 462{,}02 = \underline{3580{,}67\,kW}$$

## 6.8 Celkové potřebné teplo

$$Q_C = Q_{p3} + Q_{p2} + Q_{p1} + Q_{ZT} + Q_{výp} + Q_{EKO}$$

$$Q_C = 1500 + 2448 + 1643 + 182{,}76 + 12357{,}46 + 3580{,}67 = \underline{21711{,}89\,kW}$$

## 6.9 Přehled

| Teplosměnná plocha | | Teplota | Tlak | Entalpie | Tepelný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| | | [ºC] | [MPa] | [kJ/kg] | [kW] |
| Přehřívák 3 | výstup | 450,00 | 5,0 | 3317,03 | 1500 |
| | vstup | 377,76 | 5,2 | 3137,03 | |
| Přehřívák 2 | výstup | 422,96 | 5,2 | 3249,22 | 2448 |
| | vstup | 310,19 | 5,4 | 2943,22 | |
| Přehřívák 1 | výstup | 337,25 | 5,4 | 3023,82 | 1643 |
| | vstup | 276,26 | 5,6 | 2811,82 | |
| Závěsné trubky | výstup | 276,26 | 5,6 | 2811,82 | 182,76 |
| | vstup | 271,70 | 5,65 | 2788,24 | |
| Výparník | výstup | 271,69 | 5,65 | 2788,24 | 12357,46 |
| | vstup | 271,69 | 5,65 | 1193,72 | |
| Ekonomizér | výstup | 211,68 | 5,65 | 906,63 | 3580,67 |
| | vstup | 105,00 | 6,05 | 444,60 | |

***Tab. 6.9.1*** *– Výpočtové parametry páry/vody*

# 7 Výpočet I. tahu

**Teplota v ohništi**

$$t_{sp1} = \underline{1564{,}87\,°C}$$

$$\Rightarrow I_{sp1} = \underline{2584{,}35\,kJ/m^3}$$

**Teplota na konci I. tahu**

$$t_{sp2} = \underline{855{,}10\,°C}$$

$$\Rightarrow I_{sp2} = \underline{1360{,}83\,kJ/m^3}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{1564{,}87 + 855{,}10}{2} = \underline{1209{,}99\,°C}$$

$$\Rightarrow T = \underline{1483{,}14\,K}$$

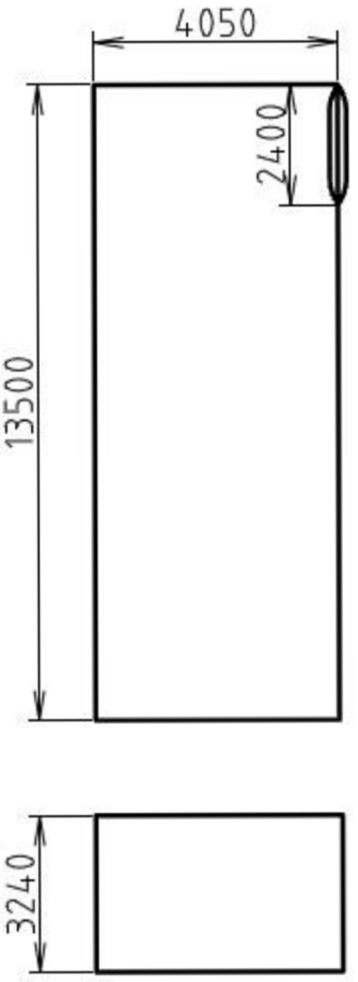
**Rozměry I. tahu**

- Šířka spalovací komory : a = 3,24m
- Hloubka spalovací komory: b = 4,05 m
- Výška spalovací komory: c = 13,5 m
- Výška mříže: $c_m$ = 2,4 m

**Rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{a \cdot b} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15}$$

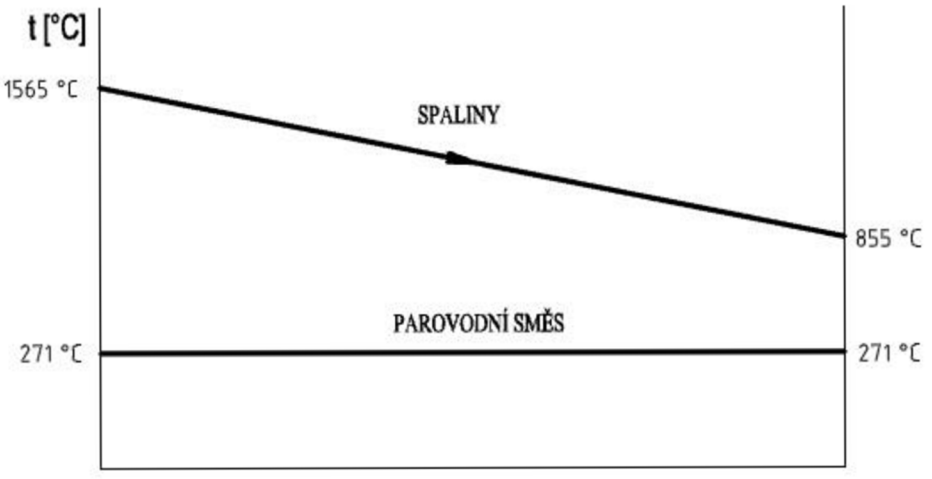
$$w_{sp} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{3{,}24 \cdot 4{,}05} \cdot \frac{273{,}15 + 1209{,}99}{273{,}15} = \underline{4{,}22\,m/s}$$




***Obr. 7.1*** *– Rozměry I. tahu*

**Teplo předané ve výparníku**

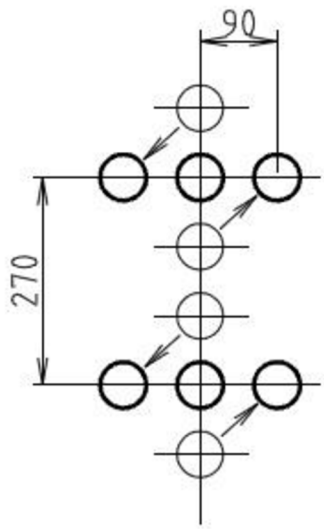
$$Q = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot (2584{,}35 - 1360{,}83) = \underline{12484{,}60\,kW}$$




***Obr. 7.2*** *– Tepelné schéma I. tahu*

# 8 Mříž

Mříž je teplosměnná plocha mezi I. a II. tahem. Je tvořena trubkami výparníku o průměru 60 mm stejně jako v I. tahu, jen v místě plochy mříže chybí praporky mezi trubkami. Trubky jsou vyhnuté tak, aby byly 3 za sebou ve směru proudění spalin (Obr 8.1). Nejprve si zvolím rychlost proudění spalin, dopočítám potřebnou výšku rozvolnění mříže a potom rychlost proudění spalin kontroluji, neměla by přesáhnout 7 m/s.




***Obr. 8.1** – Schéma rozvolnění*

**Teplota spalin na vstupu**

$$t_{sp1} = \underline{855{,}10\,°C}$$

$$\Rightarrow I_{sp1} = \underline{1360{,}83\,kJ/m^3}$$

**Teplota spalin na výstupu**

$$t_{sp2} = \underline{828{,}45\,°C}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{855{,}10 + 828{,}45}{2} = \underline{841{,}77\,°C} \qquad \Rightarrow T = \underline{1114{,}92\,K}$$

| | |
|---|---|
| Teoretická rychlost proudění spalin | w = 7 m/s |
| Počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ = 12 |
| Počet řad | $n_{řad}$ = 3 |
| Průměr trubek | d = 0,06 m |

**Výpočet výšky rozvolnění**

$$c_m = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp} \cdot (a - n_{tr} \cdot d)} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{7 \cdot (3{,}24 - 12 \cdot 0{,}06)} \cdot \frac{273{,}15 + 841{,}77}{273{,}15} = \underline{2{,}36\,m}$$

Volím tuto výšku rozvolnění $\Rightarrow c_m = \underline{2{,}4\,m}$

**Přepočet rychlosti proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{c \cdot (a - n_{tr} \cdot d)} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{2{,}4 \cdot (3{,}24 - 12 \cdot 0{,}06)} \cdot \frac{273{,}15 + 841{,}77}{273{,}15} = \underline{6{,}89\ \text{m/s}}$$

## 8.1 Součinitel přestupu tepla

### 8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí je pro příčné proudění spalin a pro uspořádání trubek za sebou. Trubky jsou hladké.

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

$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot 0{,}9225 \cdot 0{,}8359 \cdot \frac{0{,}0961}{0{,}06} \cdot \left(\frac{6{,}89 \cdot 0{,}06}{0{,}000138}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}608^{0{,}33} = \underline{38{,}106\ \text{W/m}^2\text{K}}$$

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

$$c_z = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (n_{řad} - 2) = 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (3 - 2) = \underline{0{,}9225}$$

**Korekční součinitel v závislosti na poměrné přímé rozteči trubek a podélné rozteči**

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)\right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 4{,}5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1{,}5}{2}\right)\right]^{-2} = \underline{0{,}8359}$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{d} = \frac{0{,}27}{0{,}06} = \underline{4{,}5}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{d} = \frac{0{,}09}{0{,}06} = \underline{1{,}5}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0961$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 0{,}000138$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | $Pr = 0{,}608$ |

### 8.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}184 \cdot 1114{,}92^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{624{,}85}{1114{,}92}\right)^4}{1 - \frac{624{,}85}{1114{,}92}} = \underline{26{,}758\ \text{W/m}^2\text{K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu plochy**

Pro výpočet mříže na výstupu z ohniště se volí Δt = 80 °C.

$$T_z = 273{,}15 + t_{syt} + \Delta t = 273{,}15 + 271{,}69 + 80 = \underline{624{,}85\,K}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-4{,}880 \cdot 100{,}41} = \underline{0{,}183}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}41}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{1114{,}92}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{4{,}880\,m^{-1} \cdot MPa^{-1}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\,MPa}$$

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

$$s = 0{,}9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{d^2} - 1 \right) = 0{,}9 \cdot 0{,}06 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}27 \cdot 0{,}09}{0{,}06^2} - 1 \right) = \underline{0{,}41\,m}$$

### 8.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 38{,}106 + 26{,}758 = \underline{64{,}864\ W/m^2K}$$

## 8.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{64{,}864}{1 + 0{,}0045 \cdot 64{,}864} = \underline{50{,}209\ W/m^2K}$$

ε součinitel zanesení výhřevné plochy [$m^2 \cdot K/W$]
dle konzultací voleno ε = 0,0045 $m^2 \cdot K/W$

**Teplo odebrané spalinám mříží**

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 50{,}209 \cdot 16{,}286 \cdot 569{,}99 \cdot 10^{-3} = \underline{466{,}08\,kW}$$

**Teplosměnná plocha mříže**

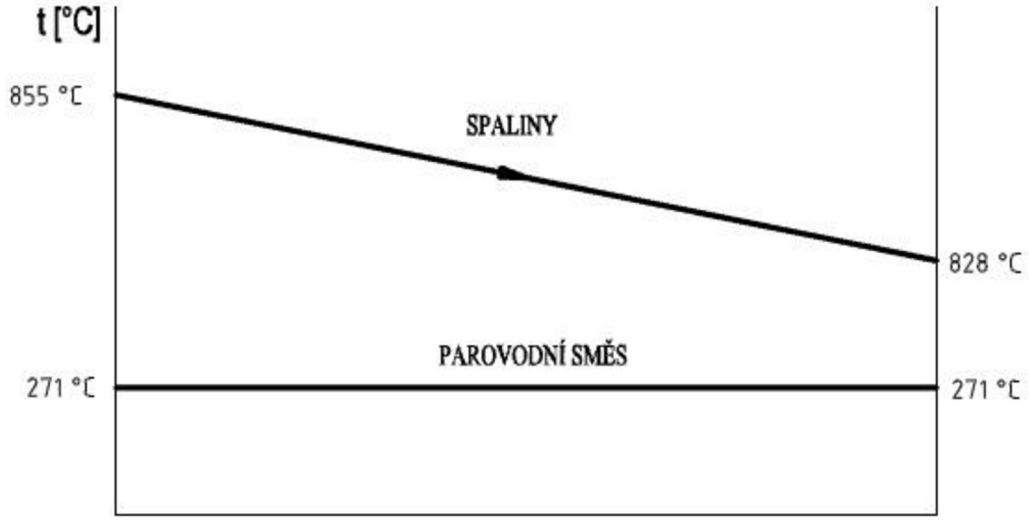
$$S = \pi \cdot d \cdot c_m \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} = \pi \cdot 0{,}06 \cdot 2{,}4 \cdot 12 \cdot 3 = \underline{16{,}286\,m^2}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{583{,}42 - 556{,}77}{\ln \frac{583{,}42}{556{,}77}} = \underline{569{,}99\,°C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 855{,}10 - 271{,}69 = \underline{583{,}42\,°C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 828{,}45 - 271{,}69 = \underline{556{,}77\,°C}$$




***Obr. 8.2.1*** *– Tepelné schéma mříže*

## 8.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z mříže

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 13885{,}72 - 466{,}08 = \underline{13419{,}63\,kW}$$

**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp1} = I_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 1360{,}83 \cdot 5{,}492 \cdot 1{,}858 = \underline{13885{,}72\,kW}$$

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{13419{,}63}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{1315{,}15\,kJ/m^3}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{828{,}45\,°C}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované téměř neliší. Rozdíl je $3{,}2 \cdot 10^{-7}$ °C.

# 9 Výpočet II. tahu

II. tah je tvořen membránovými stěnami stejně jako tah I, je to prostor od spalinové mříže až po výsypku. Nejsou v něm umístěny žádné jiné teplosměnné plochy. Hloubka se určí tak, aby se rychlost spalin pohybovala mezi 6 – 7 m/s a zároveň byla násobkem rozteče mezi výparníkovými trubkami.

**Teplota spalin na vstupu**

$$t_{sp1} = \underline{828{,}45\,°C}$$

$$\Rightarrow I_{sp1} = \underline{1315{,}15\,kJ/m^3}$$

**Teplota spalin na výstupu**

$$t_{sp2} = \underline{727{,}40\,°C}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{828{,}45 + 727{,}40}{2} = \underline{777{,}92\,°C}$$

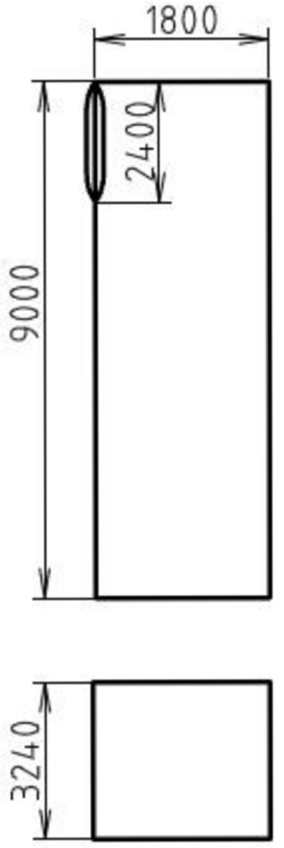
$$\Rightarrow T = \underline{1051{,}07\,K}$$

Teoretická rychlost proudění spalin w = 7 m/s

**Teoretický plošný průřez spalin**

$$S_{teor} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15}$$

$$S_{teor} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{7} \cdot \frac{273{,}15 + 777{,}92}{273{,}15} = \underline{5{,}61\,m^2}$$




***Obr. 9.1*** *– Rozměry II. tahu*

**Hloubka II. tahu**

$$b_{II} = \frac{S_{teor}}{a} = \frac{5{,}61}{3{,}24} = \underline{1{,}73\,m}$$

Volím hloubku II. tahu $\Rightarrow b_{II} = \underline{1{,}8\,m}$

**Rozměry II. tahu**

- Šířka: a = 3,24 m
- Hloubka: $b_{II}$ =1,8 m
- Výška po výsypku: $c_{II}$ = 9 m
- Výška mříže: $c_m$ = 2,4 m

**Přepočet rychlosti proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{5{,}83} \cdot \frac{273{,}15 + 777{,}92}{273{,}15} = \underline{6{,}73\,m/s}$$

**Plošný průřez spalin**

$$S = a \cdot b_{II} = 3{,}24 \cdot 1{,}8 = \underline{5{,}83\,m^2}$$

## 9.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny

### 9.1.1 Konvekcí pro podélné proudění

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

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0921}{2{,}31} \cdot \left(\frac{6{,}73 \cdot 2{,}31}{0{,}000127}\right)^{0,8} \cdot 0{,}612^{0,4} = \underline{8{,}857\ W/m^2K}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 5{,}83}{10{,}08} = \underline{2{,}31\,m}$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{II}) = 2 \cdot (3{,}24 + 1{,}8) = \underline{10{,}08\,m}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0921$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 0{,}000127$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,612 |

### 9.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}349 \cdot 1051{,}07^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{619{,}02}{1051{,}07}\right)^4}{1 - \frac{619{,}02}{1051{,}07}} = \underline{44{,}552\ W/m^2K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273{,}15 + (271{,}69 + 0{,}003 \cdot 21196{,}8) = \underline{619{,}02\,K}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}003$ m$^2$·K/W | [m$^2$·K/W] |

**Měrné zatížení II. tahu**

Určí se z předběžného tepla, které odevzdají spaliny ve II. tahu a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{(F_{st} - a \cdot c_m - a \cdot b_{II}) \cdot x_{st}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot 173{,}21}{(101{,}38 - 3{,}24 \cdot 2{,}4 - 3{,}24 \cdot 1{,}8) \cdot 0{,}95} \cdot 10^3 = \underline{21196{,}8\ \mathrm{W/m^2}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp}^{828} - I_{sp}^{727} = 1315{,}15 - 1141{,}95 = \underline{173{,}21\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2{,}300{,}101{,}84} = \underline{0{,}349}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 1{,}84}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{1051{,}07}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{2{,}30\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{a \cdot b_{II} \cdot c_{II}}{2 \cdot a \cdot b_{II} + 2 \cdot a \cdot c_{II} + 2 \cdot b_{II} \cdot c_{II}}$$

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{3{,}24 \cdot 1{,}8 \cdot 9}{2 \cdot 3{,}24 \cdot 1{,}8 + 2 \cdot 3{,}24 \cdot 9 + 2 \cdot 1{,}8 \cdot 9} = \underline{1{,}84\ \mathrm{m}}$$

### 9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (8{,}857 + 44{,}552) = \underline{48{,}069\ \mathrm{W/m^2K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

## 9.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{48{,}069}{1 + 0{,}003 \cdot 48{,}069} = \underline{42{,}010\ \mathrm{W/m^2K}}$$

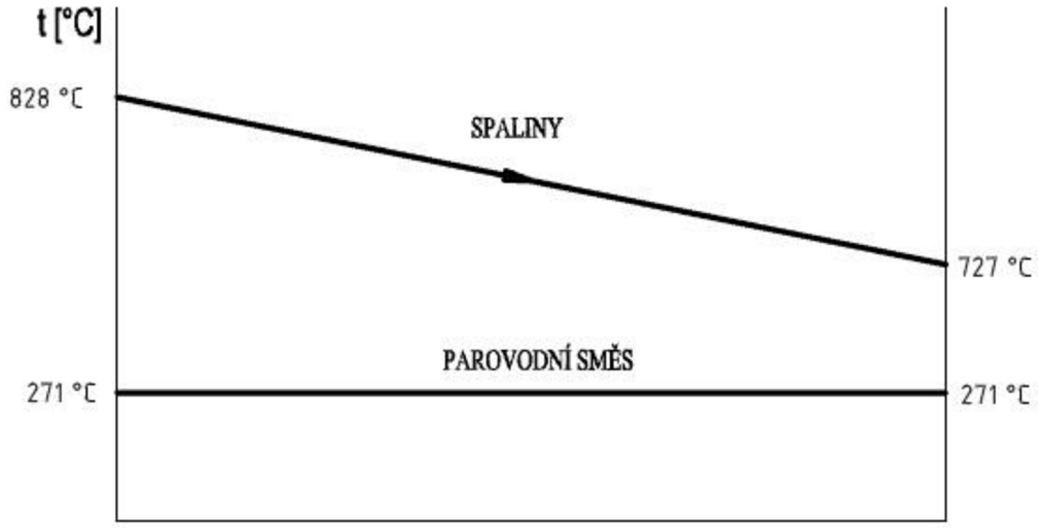
**Teplo odebrané spalinám mříží**

$$Q = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 42{,}010 \cdot 83{,}380 \cdot 504{,}56 \cdot 10^{-3} = \underline{1767{,}38\,\text{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{556{,}77 - 455{,}72}{\ln \frac{566{,}77}{455{,}72}} = \underline{504{,}56\,°\text{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 828{,}45 - 271{,}69 = \underline{556{,}77\,°\text{C}}$$
$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 727{,}40 - 271{,}69 = \underline{455{,}72\,°\text{C}}$$




***Obr. 9.2.1*** *– Tepelné schéma II. tahu*

## 9.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z II. tahu

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 13419{,}63 - 1767{,}38 = \underline{11652{,}25\,\text{kW}}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin z mříže.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{11652{,}25}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{1141{,}95\,\text{kJ/m}^3}$$
$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{727{,}40\,°\text{C}}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované téměř neliší. Rozdíl je $3{,}05 \cdot 10^{-10}$ °C.

# 10 Návrh hloubky III. tahu

Před výpočtem výsypky je potřeba navrhnout rozměr III. tahu. Ten je stanoven na základě odhadů teplotních spádů pro výsypku, přehřívák 3 a přehřívák 2. Plošný průřez, ze kterého se stanoví hloubka III. tahu, je počítán pro střední teplotu přehříváku 2 a teoretickou rychlost proudění spalin.

**Teplota spalin na výstupu II. tahu**

$$t_{II.tah}^{out} = t_{SPvýs}^{in} = \underline{727{,}40\,°C}$$

**Teplota spalin na výstupu z výsypky**

$$t_{SPvýs}^{out} = t_{SPp3}^{in} = t_{SPvýs}^{in} - 40 = 727{,}40 - 40 = \underline{687{,}40\,°C}$$

**Předpokládaná teplota spalin na výstupu z přehříváku 3**

$$t_{SPp3}^{out} = t_{SPp2}^{in} = t_{SPp3}^{in} - 100 = 687{,}40 - 100 = \underline{587{,}40\,°C}$$

**Předpokládaná teplota spalin na výstupu z přehříváku 2**

$$t_{SPp2}^{out} = t_{SPp2}^{in} - 60 = 587{,}40 - 60 = \underline{527{,}40\,°C}$$

**Střední teplota spalin v přehříváku 2**

$$t_{stř} = \frac{t_{SPp2}^{in} + t_{SPp2}^{out}}{2} = \frac{587{,}40 + 527{,}40}{2} = \underline{557{,}40\,°C}$$

| | |
|---|---|
| Teoretická rychlost proudění spalin | $w_{sp}$ = 7 m/s |
| Počet trubek v přehříváku 2 v jedné řadě | $n_{tr}$ = 32 |
| Průměr trubek v přehříváku 2 | $d_{tr}$ = 0,038 m |

**Teoretický plošný průřez spalin**

$$S_{teor} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15}$$

$$S_{teor} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{7} \cdot \frac{273{,}15 + 557{,}40}{273{,}15} = \underline{4{,}43\,m^2}$$

**Hloubka III. tahu**

$$b_{III} = \frac{S_{teor}}{a - n_{tr} \cdot d_{tr}} = \frac{4{,}65}{3{,}24 - 32 \cdot 0{,}038} = \underline{2{,}1899\,m}$$

Volím hloubku III. tahu $\Rightarrow b_{III} = \underline{2{,}7\,m}$

# 11 Výpočet výsypky mezi II. a III. tahem

Přechod mezi II. a III. tahem je tvořen výsypkou, která je tvořena membránovými stěnami. Výška výsypky je 4,5 m. Dle firemních podkladů je tento rozměr daný z toho důvodu, že do zadní stěny spalovací komory jdou ve zhruba čtyřech úrovních dýzy se sekundárním vzduchem. Dále se kontroluje rychlost spalin v nejužším kolmém rozměru, kde by rychlost spalin neměla přesáhnout hodnotu 7 m/s.

**Teplota spalin na vstupu**

$$t_{sp1} = \underline{727{,}40\,°C}$$

$$\Rightarrow I_{sp1} = \underline{1141{,}95\,kJ/m^3}$$

**Teplota spalin na výstupu**

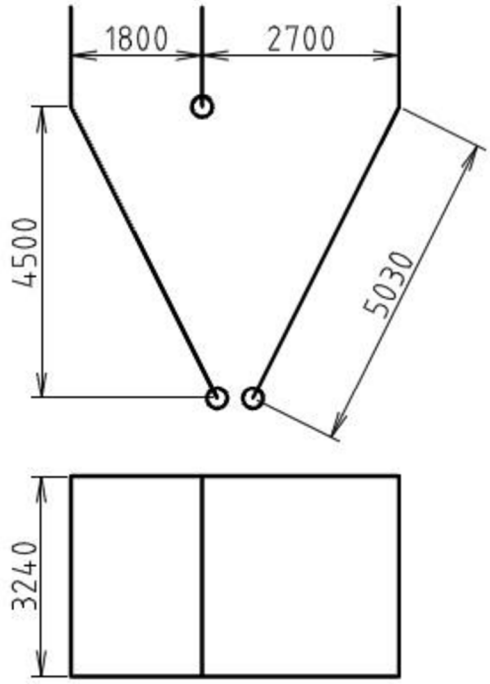
$$t_{sp2} = \underline{691{,}76\,°C}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{727{,}40 + 691{,}76}{2} = \underline{709{,}58\,°C}$$

$$\Rightarrow T = \underline{982{,}73\,K}$$




***Obr. 11.1*** *– Rozměry výsypky*

**Rozměry výsypky**

Tvarem výsypky je rovnoramenný trojúhelník.

- Šířka kotle: $a = 3{,}24$ m
- Hloubka II. tahu: $b_{II} = 1{,}8$ m
- Hloubka III. tahu: $b_{III} = 2{,}7$ m
- Průměr hloubek: $b_{stř} = 2{,}25$ m
- Výška výsypky: $c_{výs} = 4{,}5$ m
- Čela výsypky: $y = 5{,}03$ m
- Rozměr neužšího místa $x = 2{,}01$ m

**Kontrola rychlosti spalin v nejužším místě výsypky**

$$w_{sp}^{x} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{x \cdot a} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{2{,}01 \cdot 3{,}24} \cdot \frac{273{,}15 + 709{,}58}{273{,}15} = \underline{5{,}63\,m/s}$$

**Plošný průřez spalin**

$$S = a \cdot b_{stř} = 3{,}24 \cdot 2{,}25 = \underline{6{,}99\,m^2}$$

**Přepočet rychlosti proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{6{,}99} \cdot \frac{273{,}15 + 709{,}58}{273{,}15} = \underline{5{,}25\,m/s}$$

## 11.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny

### 11.1.1 Konvekcí pro podélné proudění

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

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0858}{2{,}55} \cdot \left(\frac{5{,}25 \cdot 2{,}55}{0{,}000116}\right)^{0,8} \cdot 0{,}620^{0,4} = \underline{7{,}188\ W/m^2K}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O_{stř}} = \frac{4 \cdot 6{,}99}{10{,}98} = \underline{2{,}55\ m}$$

**Střední obvod kanálu pro II. a III. tah**

$$O_{stř} = 2 \cdot (a + b_{stř}) = 2 \cdot (3{,}24 + 2{,}25) = \underline{10{,}98\ m}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0858$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 0{,}000116$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,620 |

### 11.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}354 \cdot 982{,}73^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{582{,}06}{982{,}73}\right)^4}{1 - \frac{582{,}06}{982{,}73}} = \underline{37{,}096\ W/m^2K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273{,}15 + (271{,}69 + 0{,}003 \cdot 12412{,}68) = \underline{582{,}06\ K}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}003$ m$^2$·K/W | [m$^2$·K/W] |

**Měrné zatížení výsypky**

Určí se z předběžného tepla, které odevzdají spaliny výsypce a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{(F_{st} - a \cdot b_{III} - a \cdot b_{II}) \cdot x_{st}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot 61{,}08}{(67{,}43 - 3{,}24 \cdot 2{,}7 - 3{,}24 \cdot 1{,}8) \cdot 0{,}95} \cdot 10^3 = \underline{12412{,}68\ W/m^2}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp}^{727} - I_{sp}^{691} = 1141{,}95 - 1080{,}87 = \underline{61{,}08\ kJ/m^3}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2{,}460{,}101{,}75} = \underline{0{,}354}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 1{,}75}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{982{,}73}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{2{,}46\ m^{-1} \cdot MPa^{-1}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ MPa}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 3{,}6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3{,}6 \cdot \frac{\frac{(b_{II} + b_{III}) \cdot c_{výs}}{2} \cdot a}{(b_{II} + b_{III}) \cdot a + 2 \cdot y \cdot a + 2 \cdot \frac{(b_{II} + b_{III}) \cdot c_{výs}}{2}}$$

$$s = 3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot \frac{\frac{(1{,}8 + 2{,}7) \cdot 4{,}5}{2} \cdot 3{,}24}{(1{,}8 + 2{,}7) \cdot 3{,}24 + 2 \cdot 5{,}03 \cdot 3{,}24 + 2 \cdot \frac{(1{,}8 + 2{,}7) \cdot 4{,}5}{2}} = 3{,}6 \cdot \frac{32{,}81}{67{,}43} = \underline{1{,}75\ m}$$

### 11.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}7 \cdot (7{,}188 + 37{,}096) = \underline{30{,}999\ W/m^2K}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}7$

## 11.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{30{,}999}{1 + 0{,}003 \cdot 30{,}999} = \underline{28{,}361\ W/m^2K}$$

**Teplo odebrané spalinám mříží**

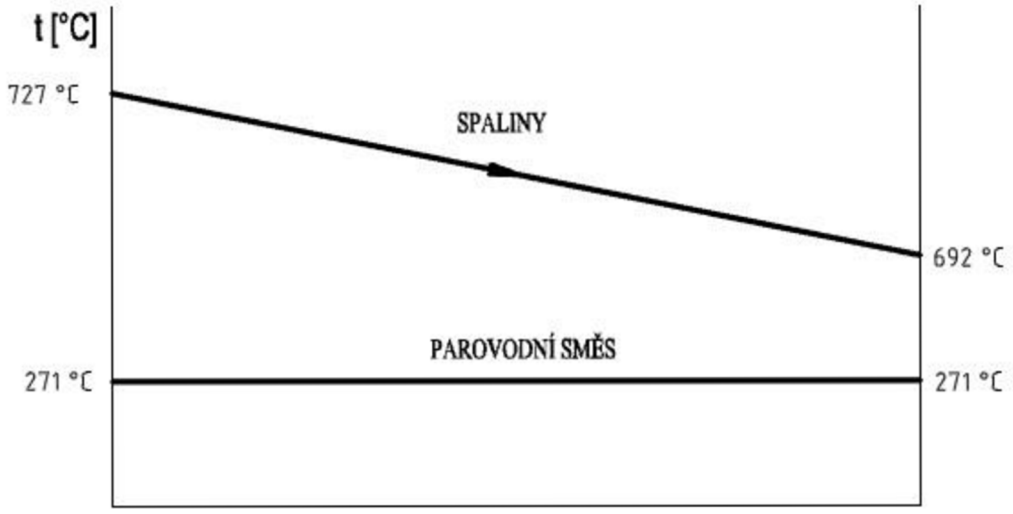
$$Q = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 28{,}361 \cdot 50{,}210 \cdot 437{,}66 \cdot 10^{-3} = \underline{623{,}24\ kW}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{455{,}72 - 420{,}08}{\ln \frac{455{,}72}{420{,}08}} = \underline{437{,}66\,°C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 727{,}40 - 271{,}69 = \underline{455{,}72\,°C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 691{,}76 - 271{,}69 = \underline{420{,}08\,°C}$$




***Obr. 11.2.1*** *– Tepelné schéma výsypky*

## 11.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z výsypky

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 11652{,}25 - 623{,}24 = \underline{11029{,}02\,kW}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin II. tahu.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

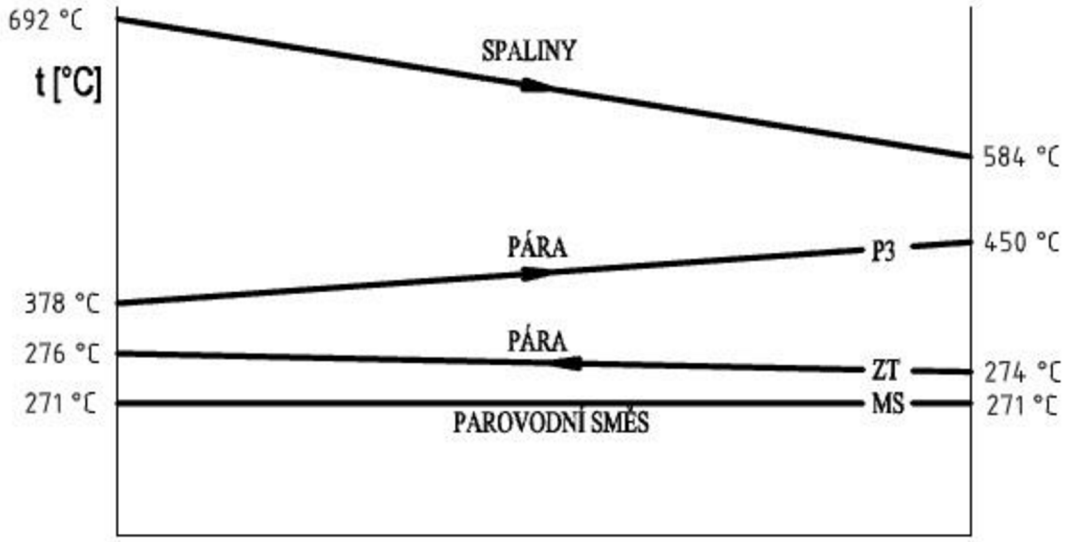
$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{11029{,}02}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{1080{,}87\,kJ/m^3}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{691{,}76\,°C}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované téměř neliší. Rozdíl je $7{,}13 \cdot 10^{-7}$ °C.

# 12 Výpočet III. tahu – I. část

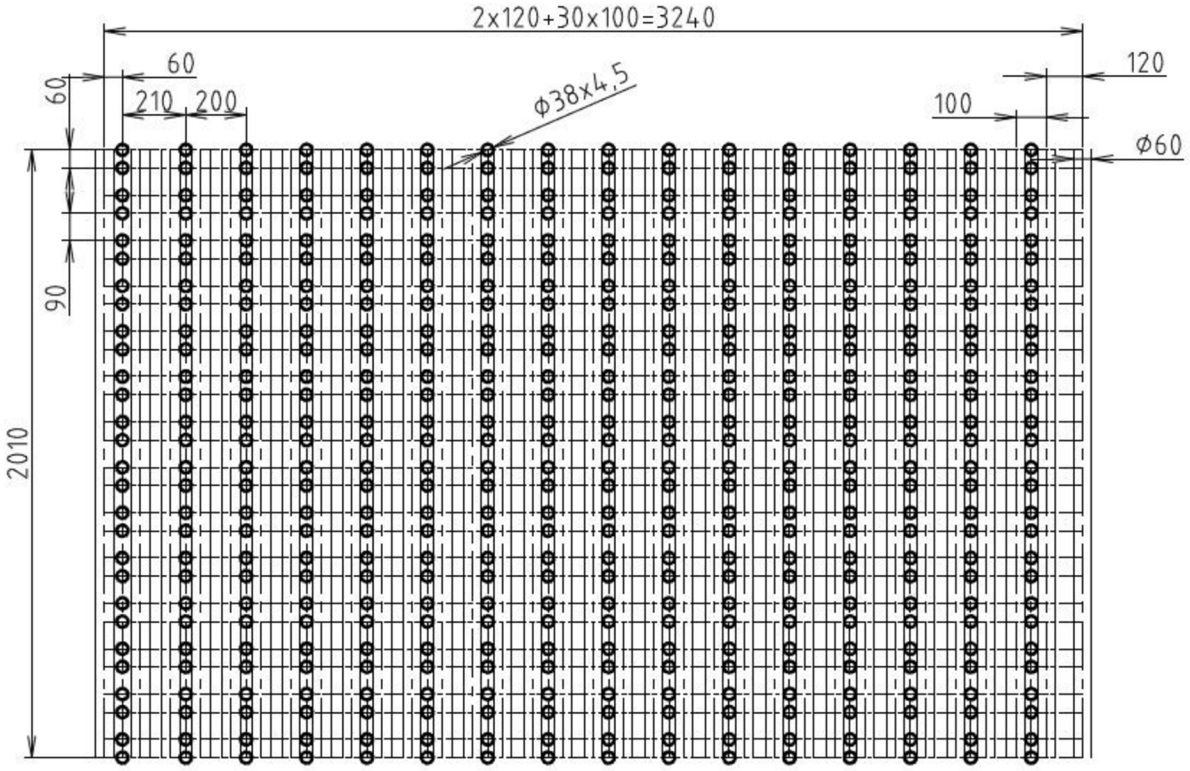
Při výpočtu I. části ve III. tahu uvažujeme s trubkovým svazkem přehříváku 3. Dále s membránovými stěnami a závěsnými trubkami, které zaujímají prostor výšky přehříváku 3.




***Obr. 12.1*** *– Tepelné schéma I. části III. tahu*

## 12.1 Přehřívák 3

Přehřívák 3 je trubkový svazek, který je tvořen hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4,5 mm. Tento svazek je navržen jako dvojhad a trubky jsou uspořádány za sebou tak, aby svazek zabíral jednu maximální plochu.




***Obr. 12.1.1*** *– Rozměry přehříváku 3*

**Parametry**

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr | D | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | t | [m] | 0,0045 |
| vnitřní průměr | d | [m] | 0,029 |
| příčná rozteč | $s_1$ | [m] | 0,2 |
| podélná rozteč | $s_2$ | [m] | 0,09 (0,06) |
| počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ | [-] | 16 |
| počet řad | $n_{řad}$ | [-] | 14 |
| počet hadů | $n_h$ | [-] | 2 |
| počet závěsných trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |
| hloubka III. tahu | $b_{III}$ | [m] | 2,7 |
| šířka III. tahu | a | [m] | 3,24 |

***Tab. 12.1.1** – Parametry trubek přehříváku 3*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_1$ | [°C] | 377,76 |
| teplota páry na výstupu | $t_2$ | [°C] | 450 |
| střední teplota páry | $t_{12}$ | [°C] | 413,88 |
| tlak páry na vstupu | $p_1$ | [MPa] | 5,2 |
| tlak páry na výstupu | $p_2$ | [MPa] | 5 |
| střední tlak páry | $p_{12}$ | [MPa] | 5,1 |
| měrný objem na vstupu | $v_1$ | [$m^3$/kg] | 0,05296 |
| měrný objem na výstupu | $v_2$ | [$m^3$/kg] | 0,06333 |
| střední měrný objem | $v_{12}$ | [$m^3$/kg] | 0,05814 |
| průtočné množství páry | $M_{pp}$ | [kg/s] | 8,33 |

***Tab. 12.1.2** – Parametry páry přehříváku 3*

| Parametry spalin | | | |
|---|---|---|---|
| teplota spalin na vstupu | $t_{sp1}$ | [°C] | 691,76 |
| teplota spalin na výstupu | $t_{sp2}$ | [°C] | 585,37 |
| entalpie spalin na vstupu | $i_{sp1}$ | [kJ/$m^3$] | 1080,87 |
| entalpie spalin na výstupu | $i_{sp2}$ | [kJ/$m^3$] | 898,51 |

***Tab. 12.1.3** – Parametry spalin přehříváku 3*

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{691{,}76 + 585{,}37}{2} = \underline{638{,}56\,°C}$$

**Předpokládaná plocha svazku**

$$S = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 2{,}7 \cdot 16 \cdot 14 \cdot 2 = \underline{144{,}40\,m^2}$$

### 12.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0610}{0{,}029} \cdot \left(\frac{22{,}92 \cdot 0{,}029}{1{,}45 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 0{,}997^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = \underline{1632{,}53\,W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0{,}029^2}{4} \cdot 16 \cdot 2 = \underline{0{,}02114\ m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{8{,}33 \cdot 0{,}05814}{0{,}02114} = \underline{22{,}92\ m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0610$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 1{,}45 \cdot 10^{-6}$ m²/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,997 |

### 12.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou**

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

$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}0794}{0{,}038} \cdot \left(\frac{4{,}78 \cdot 0{,}038}{0{,}000102}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}628^{0{,}33} = \underline{46{,}512\ W/m^2K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{7{,}11} \cdot \frac{273{,}15 + 638{,}56}{273{,}15} = \underline{4{,}78\ m/s}$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 2{,}7 \cdot (3{,}24 - 16 \cdot 0{,}038) = \underline{7{,}11\ m^2}$$

**Oprava na uspořádání svazku $c_s$**

V závislosti na poměrné příčné rozteči $\sigma_1$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0{,}2}{0{,}038} = \underline{5{,}26}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0{,}09}{0{,}038} = \underline{2{,}37}$$

Pokud je $\sigma_2 \geq 2$, potom $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad $c_z$**

Pokud je počet řad $\geq 10$, potom $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0794$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 0{,}000102$ m²/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,628 |

**Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}280 \cdot 911{,}71^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{755{,}72}{911{,}71}\right)^4}{1-\frac{755{,}72}{911{,}71}} = \underline{33{,}545\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p3}}{S} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273{,}15 + 413{,}88 + \left(0{,}006 + \frac{1}{1632{,}53}\right) \cdot \frac{1500}{144{,}40} \cdot 10^3 = \underline{755{,}72\ \mathrm{K}}$$

$\varepsilon$ součinitel zanesení výhřevné plochy $[m^2 \cdot K/W]$
dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}006\ m^2 \cdot K/W$

**Potřebné teplo pro P3**

$$Q_{p3} = \underline{1500\ \mathrm{kW}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3{,}72 \cdot 0{,}100 \cdot 0{,}87} = \underline{0{,}280}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}87}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{911{,}71}{1000}\right) \cdot 0{,}2851 = \underline{3{,}72\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}2 \cdot 0{,}15}{0{,}038^2} - 1\right) = \underline{0{,}87\ \mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 46{,}512 + 33{,}545 = \underline{80{,}056\ \mathrm{W/m^2K}}$$

### 12.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0{,}65 \cdot 80{,}056}{1 + \frac{80{,}056}{1632{,}528}} = \underline{49{,}604\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 3**

$$S_{id} = \frac{Q_{p3}}{k \cdot \Delta t} \cdot 1000 = \frac{1500}{49{,}604 \cdot 212{,}31} \cdot 1000 = \underline{142{,}43\ \mathrm{m^2}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{314{,}00 - 135{,}37}{\ln \frac{314{,}00}{135{,}37}} = \underline{212{,}31\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_1 = 691{,}69 - 377{,}76 = \underline{314{,}00\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_2 = 585{,}37 - 450 = \underline{135{,}37\ °\mathrm{C}}$$

**Skutečně odebrané teplo přehřívákem 3**

$$Q_{skp3} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 49{,}604 \cdot 144{,}40 \cdot 212{,}31 \cdot 10^{-3} = \underline{1520{,}73\ \mathrm{kW}}$$

Předpokládaná plocha svazku je 144,40 m$^2$, liší se od potřebné teplosměnné plochy, která je 142,43 m$^2$, o 1,36 %. Tento rozdíl je přijatelný.

**Výška prostoru přehříváku 3**

$$h_{p3} = n_{řad} \cdot 0{,}06 + (n_{řad} - 1) \cdot 0{,}09 = 14 \cdot 0{,}06 + (14 - 1) \cdot 0{,}09 = \underline{2{,}01\ \mathrm{m}}$$

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{8{,}33 \cdot 0{,}05814}{22{,}92} = \underline{0{,}0317\ \mathrm{m^2}}$$

**Průměr komor**

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}0317}{\pi}} = \underline{0{,}201\ \mathrm{m}}$$

Volím trubku TR 219x6,3 ČSN 42 5715.01

## 12.2 Výpočet membránových stěn

### 12.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

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

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0794}{0{,}276} \cdot \left( \frac{4{,}78 \cdot 0{,}276}{0{,}000102} \right)^{0{,}8} \cdot 0{,}628^{0{,}4} = \underline{10{,}702\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 7{,}11}{103{,}32} = \underline{0{,}276\,\text{m}}$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D$$

$$O = 2 \cdot (3{,}24 + 2{,}7) + 16 \cdot (2{,}7 + 0{,}038) + 32 \cdot \pi \cdot 0{,}038 = \underline{103{,}32\,\text{m}}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0794$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 0{,}000102$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,628 |

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}180 \cdot 911{,}71^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{813{,}55}{911{,}71}\right)^4}{1 - \frac{813{,}55}{911{,}71}} = \underline{23{,}831\,\text{W/m}^2\text{K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273{,}15 + (271{,}69 + 0{,}0035 \cdot 76778) = \underline{813{,}55\,\text{K}}$$

$\varepsilon$ součinitel zanesení výhřevné plochy [m$^2$·K/W]
dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}0035$ m$^2$·K/W

**Měrné zatížení**

Určí se z předběžného tepla, které odevzdají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{2 \cdot h_{p3} \cdot (a + b_{III})} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot 182{,}36}{2 \cdot 2{,}01 \cdot (3{,}24 + 2{,}7)} \cdot 10^3 = \underline{76778\,\text{W/m}^2}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp}^{691} - I_{sp}^{585} = 1080{,}87 - 898{,}51 = \underline{182{,}36\,\text{kJ/m}^3}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-6{,}390{,}100{,}31} = \underline{0{,}180}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}31}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{911{,}71}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{6{,}39\ m^{-1} \cdot MPa^{-1}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ MPa}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = \frac{1{,}8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p3}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1{,}8}{\frac{1}{2{,}7} + \frac{1}{2{,}01} + \frac{1}{0{,}2}} = \underline{0{,}31\ m}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (10{,}702 + 23{,}831) = \underline{31{,}080\ W/m^2K}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

### 12.2.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{31{,}080}{1 + 0{,}0035 \cdot 31{,}080} = \underline{28{,}030\ W/m^2K}$$

**Teplo odebrané spalinám membránovými stěnami**

$$Q_{ms} = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 28{,}030 \cdot 24{,}24 \cdot 364{,}30 \cdot 10^{-3} = \underline{247{,}48\ kW}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{420{,}08 - 313{,}69}{\ln \frac{420{,}08}{313{,}69}} = \underline{364{,}30\ °C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 691{,}76 - 271{,}69 = \underline{420{,}08\ °C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 585{,}37 - 271{,}69 = \underline{313{,}69\ °C}$$

## 12.3 Výpočet závěsných trubek

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr trubky | $D_{zt}$ | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | $t_{zt}$ | [m] | 0,0063 |
| vnitřní průměr trubky | $d_{zt}$ | [m] | 0,0254 |
| počet trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |

***Tab. 12.3.1*** *– Parametry závěsných trubek u P3*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_{zt1}$ | [°C] | 274,26 |
| teplota páry na výstupu | $t_{zt2}$ | [°C] | 276,26 |
| střední teplota páry | $t_{ztstř}$ | [°C] | 275,26 |
| měrný objem na vstupu | $v_{zt1}$ | [m$^3$/kg] | 0,03552 |
| měrný objem na výstupu | $v_{zt2}$ | [m$^3$/kg] | 0,03586 |
| střední měrný objem | $v_{ztstř}$ | [m$^3$/kg] | 0,03569 |

***Tab. 12.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek u P3*

### 12.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0574}{0{,}0254} \cdot \left(\frac{17{,}14 \cdot 0{,}0254}{6{,}61 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1{,}414^{0,4} = \underline{2626{,}119\ W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0{,}0254^2}{4} \cdot 32 = \underline{0{,}016\ m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{zt\,stř}}{F_p} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}03569}{0{,}016} = \underline{17{,}14\ m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0574$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 6{,}61 \cdot 10^{-7}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 1,414 |

### 12.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekcí uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = \underline{46{,}512\ W/m^2K}$$

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}280 \cdot 911{,}71^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{627{,}69}{911{,}71}\right)^4}{1-\frac{627{,}69}{911{,}71}} = \underline{27{,}058\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + t_{ztstř} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S_{zt}} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273{,}15 + 275{,}26 + \left(0{,}003 + \frac{1}{2626{,}119}\right) \cdot \frac{98{,}37}{7{,}79} \cdot 10^3 = \underline{627{,}69\ \mathrm{K}}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}003\ m^2 \cdot K/W$ | $[m^2 \cdot K/W]$ |

**Potřebné teplo pro závěsné trubky**

$$Q_{zt} = \underline{98{,}37\ \mathrm{kW}}$$

**Teplosměnná plocha závěsných trubek**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p3} = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 32 \cdot 2{,}01 = \underline{7{,}79\ \mathrm{m^2}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3{,}720{,}100{,}87} = \underline{0{,}280}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}87}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{911{,}71}{1000}\right) \cdot 0{,}2851 = \underline{3{,}72\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}2 \cdot 0{,}15}{0{,}038^2} - 1 \right) = \underline{0{,}87\ \mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (46{,}512 + 27{,}058) = \underline{66{,}212\ \mathrm{W/m^2K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

### 12.3.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0{,}6 \cdot 66{,}212 = \underline{39{,}727\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 39{,}727 \cdot 7{,}79 \cdot 360{,}79 \cdot 10^{-3} = \underline{111{,}70\ \mathrm{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{415{,}50 - 311{,}11}{\ln \frac{415{,}50}{311{,}11}} = \underline{360{,}79\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 691{,}76 - 276{,}26 = \underline{415{,}50\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 585{,}37 - 274{,}26 = \underline{311{,}11\ °\mathrm{C}}$$

## 12.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 1. části III. tahu

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp3} - Q_{ms} - Q_{zt} = 11029{,}02 - 1520{,}73 - 247{,}48 - 111{,}70 = \underline{9149{,}10\ \mathrm{kW}}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin výsypky.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

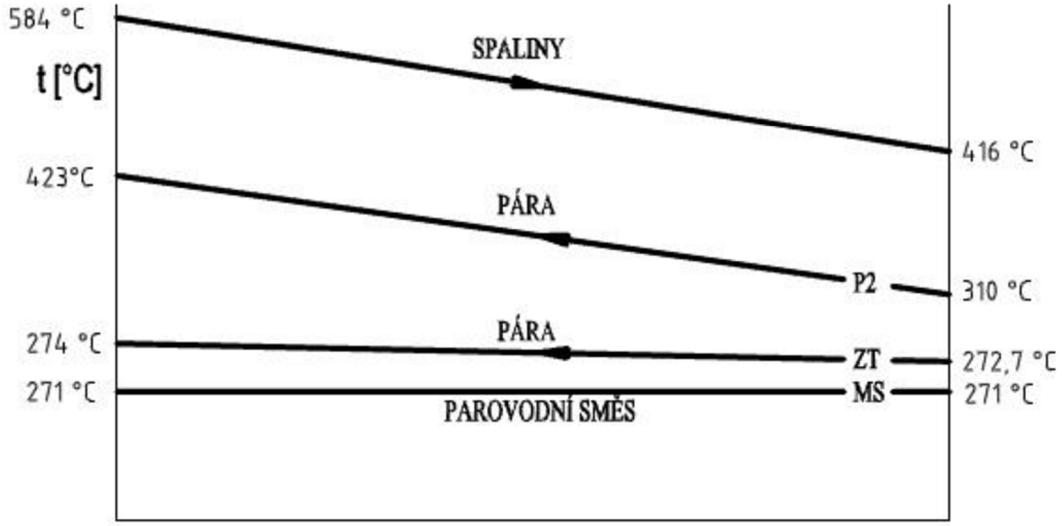
$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{9149{,}10}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{896{,}63\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{584{,}27\ °\mathrm{C}}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované liší o 1,09 °C. Tento rozdíl je přijatelný.

# 13 Výpočet III. tahu – II. část

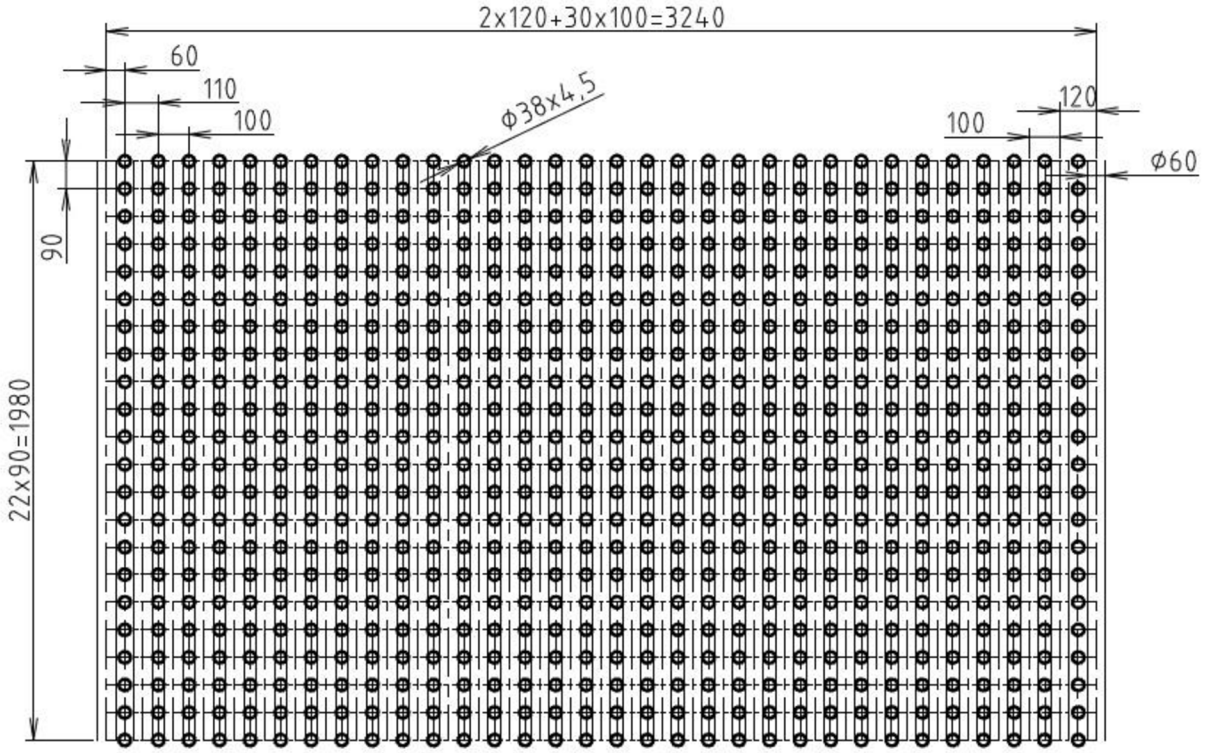
Při výpočtu II. části ve III. tahu uvažujeme s trubkovým svazkem přehříváku 2. Dále s membránovými stěnami a závěsnými trubkami, které zaujímají prostor výšky přehříváku 2 a výšky dvou kontrolních vlezů. Jeden je mezi přehřívákem 3 a přehřívákem 2, druhý je pak mezi dvěma částmi přehříváku 2.



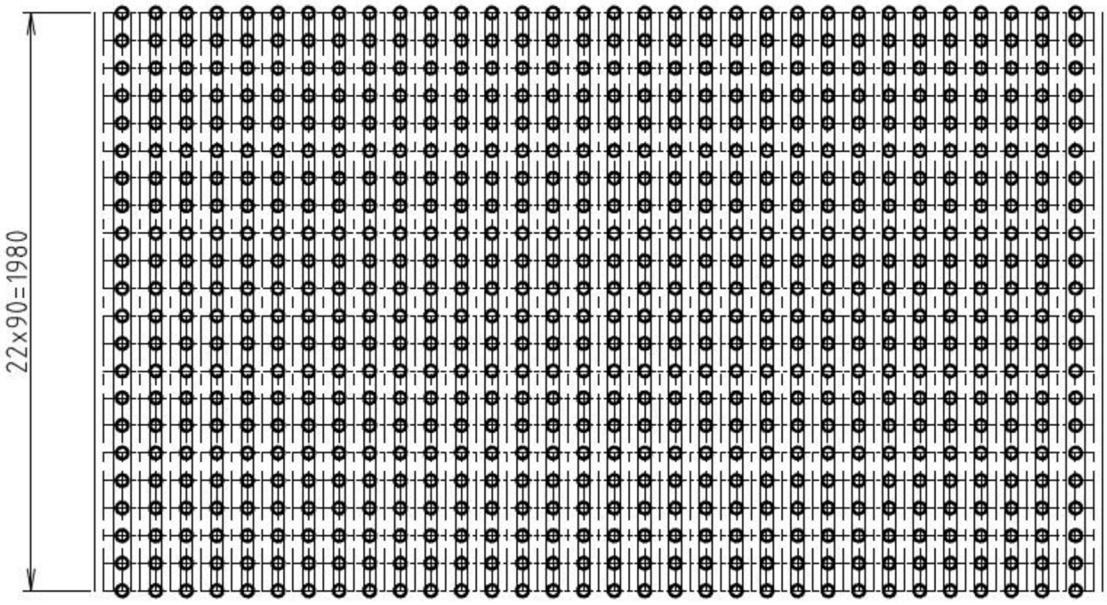

***Obr. 13.1*** *– Tepelné schéma II. části III. tahu*

## 13.1 Přehřívák 2

Přehřívák 2 je trubkový svazek, který je tvořen hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4,5 mm. Tento svazek je navržen jako jednohad a trubky jsou uspořádány za sebou tak, aby svazek zabíral dvě maximální plochy.




***Obr. 13.1.1*** *– Rozměry přehříváku 2, první část*




***Obr. 13.1.2*** *– Rozměry přehříváku 2, druhá část*

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr | D | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | t | [m] | 0,0045 |
| vnitřní průměr | d | [m] | 0,029 |
| příčná rozteč | $s_1$ | [m] | 0,1 |
| podélná rozteč | $s_2$ | [m] | 0,09 |
| počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ | [-] | 32 |
| počet řad | $n_{řad}$ | [-] | 46 |
| počet hadů | $n_h$ | [-] | 1 |
| počet závěsných trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |
| hloubka III. tahu | $b_{III}$ | [m] | 2,7 |
| šířka III. tahu | a | [m] | 3,24 |

***Tab. 13.1.1*** *– Parametry trubek přehříváku 2*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_1$ | [°C] | 310,19 |
| teplota páry na výstupu | $t_2$ | [°C] | 422,96 |
| střední teplota páry | $t_{12}$ | [°C] | 366,58 |
| tlak páry na vstupu | $p_1$ | [MPa] | 5,4 |
| tlak páry na výstupu | $p_2$ | [MPa] | 5,2 |
| střední tlak páry | $p_{12}$ | [MPa] | 5,3 |
| měrný objem na vstupu | $v_1$ | [$m^3$/kg] | 0,04270 |
| měrný objem na výstupu | $v_2$ | [$m^3$/kg] | 0,05791 |
| střední měrný objem | $v_{12}$ | [$m^3$/kg] | 0,05031 |
| průtočné množství páry | $M_{pp}$ | [kg/s] | 8 |

***Tab. 13.1.2*** *– Parametry páry přehříváku 2*

| Parametry spalin | | | |
|---|---|---|---|
| teplota spalin na vstupu | $t_{sp1}$ | [°C] | 584,27 |
| teplota spalin na výstupu | $t_{sp2}$ | [°C] | 415,78 |
| entalpie spalin na vstupu | $i_{sp1}$ | [kJ/$m^3$] | 896,63 |
| entalpie spalin na výstupu | $i_{sp2}$ | [kJ/$m^3$] | 607,83 |

***Tab. 13.1.3*** *– Parametry spalin přehříváku 2*

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{584{,}27 + 415{,}78}{2} = \underline{500{,}02\,°C}$$

**Předpokládaná plocha svazku**

$$S = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 2{,}7 \cdot 32 \cdot 46 \cdot 1 = \underline{474{,}47\,m^2}$$

### 13.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0569}{0{,}029} \cdot \left(\frac{19{,}04 \cdot 0{,}029}{1{,}16 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 1{,}052^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = \underline{1607{,}86\,W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0{,}029^2}{4} \cdot 32 \cdot 1 = \underline{0{,}02114\,m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{8 \cdot 0{,}05031}{0{,}02114} = \underline{19{,}04\,m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0569$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 1{,}16 \cdot 10^{-6}$ m²/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 1,052 |

### 13.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou**

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

$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}067}{0{,}038} \cdot \left(\frac{5{,}29 \cdot 0{,}038}{7{,}7 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \cdot 0{,}639^{0,33} = \underline{50{,}536\,W/m^2K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{5{,}46} \cdot \frac{273{,}15 + 500{,}02}{273{,}15} = \underline{5{,}29\,m/s}$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 2{,}7 \cdot (3{,}24 - 32 \cdot 0{,}038) = \underline{5{,}46\,m^2}$$

**Oprava na uspořádání svazku $c_s$**

V závislosti na poměrné příčné rozteči $\sigma_1$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = \underline{2,63}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = \underline{2,37}$$

Pokud je $\sigma_2 \geq 2$, potom $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad $c_z$**

Pokud je počet řad $\geq 10$, potom $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0,0670$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 7,7 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,639 |

**Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,172 \cdot 773,17^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{663,57}{773,17}\right)^4}{1-\frac{663,57}{773,17}} = \underline{13,174 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p3}}{S} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273,15 + 366,58 + \left(0,004 + \frac{1}{1607,86}\right) \cdot \frac{2448}{474,47} \cdot 10^3 = \underline{663,57 \text{ K}}$$

$\varepsilon$ součinitel zanesení výhřevné plochy [m$^2$·K/W]
dle konzultací voleno $\varepsilon = 0,004$ m$^2$·K/W

**Potřebné teplo pro přehřívák 2**

$$Q_{p2} = \underline{2448 \text{ kW}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-7,860 \cdot 100 \cdot 24} = \underline{0,172}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}24}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{773{,}17}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{7{,}86\ m^{-1} \cdot MPa^{-1}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ MPa}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}1 \cdot 0{,}09}{0{,}038^2} - 1 \right) = \underline{0{,}24\ m}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 50{,}536 + 13{,}174 = \underline{63{,}709\ W/m^2K}$$

### 13.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0{,}65 \cdot 63{,}709}{1 + \frac{63{,}709}{1607{,}856}} = \underline{39{,}833\ W/m^2K}$$

**Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 2**

$$S_{id} = \frac{Q_{p2}}{k \cdot \Delta t} \cdot 1000 = \frac{2448}{39{,}833 \cdot 131{,}49} \cdot 1000 = \underline{467{,}40\ m^2}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{161{,}31 - 105{,}58}{\ln \frac{161{,}31}{105{,}58}} = \underline{131{,}49\ °C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 584{,}27 - 422{,}96 = \underline{161{,}31\ °C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 415{,}78 - 310{,}19 = \underline{105{,}58\ °C}$$

**Skutečně odebrané teplo přehřívákem 2**

$$Q_{skp2} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 39{,}833 \cdot 474{,}47 \cdot 131{,}49 \cdot 10^{-3} = \underline{2484{,}98\ kW}$$

Předpokládaná plocha svazku je 474,47 $m^2$, liší se od potřebné teplosměnné plochy, která je 467,40 $m^2$, o 1,49 %. Tento rozdíl je přijatelný.

**Výška prostoru přehříváku 2**

Včetně dvou kontrolních vlezů. První se nachází mezi přehřívákem 3 a přehřívákem 2, druhý rozděluje plochu přehříváku 2.

$$h_{p2} = (n_{řad} - 1) \cdot s_2 + 0{,}8 + 0{,}8 = (46 - 1) \cdot 0{,}09 + 0{,}8 + 0{,}8 = \underline{5{,}65\,m}$$

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{8{,}00 \cdot 0{,}05031}{19{,}04} = \underline{0{,}0317\,m^2}$$

**Průměr komor**

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}0317}{\pi}} = \underline{0{,}201\,m}$$

Volím trubku TR 219x6,3 ČSN 42 5715.01

## 13.2 Výpočet membránových stěn

### 13.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

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

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0670}{0{,}212} \cdot \left(\frac{5{,}29 \cdot 0{,}212}{7{,}7 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,8} \cdot 0{,}639^{0,4} = \underline{12{,}999\,W/m^2K}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 5{,}46}{103{,}32} = \underline{0{,}212\,m}$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D$$

$$O = 2 \cdot (3{,}24 + 2{,}7) + 32 \cdot (2{,}7 + 0{,}038) + 32 \cdot \pi \cdot 0{,}038 = \underline{103{,}32\,m}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0670$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 7{,}7 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,639 |

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}149 \cdot 773{,}17^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{698{,}49}{773{,}17}\right)^4}{1-\frac{698{,}49}{773{,}17}} = \underline{12{,}182\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273{,}15 + (271{,}69 + 0{,}0035 \cdot 43903) = \underline{698{,}49\ \mathrm{K}}$$

| | | |
|---|---|---|
| ε | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno ε = 0,0035 $m^2 \cdot K/W$ | [$m^2 \cdot K/W$] |

**Měrné zatížení**

Určí se z předběžného tepla, které odevzdají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{2 \cdot h_{p2} \cdot (a + b_{III})} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot 288{,}80}{2 \cdot 5{,}65 \cdot (3{,}24 + 2{,}7)} \cdot 10^3 = \underline{43903\ \mathrm{W/m^2}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp}^{584} - I_{sp}^{415} = 896{,}63 - 607{,}83 = \underline{288{,}80\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9{,}3 \cdot 0{,}100{,}17} = \underline{0{,}149}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}17}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{773{,}17}{1000}\right) \cdot 0{,}2851 = \underline{9{,}31\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p2}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{2,7} + \frac{1}{5,65} + \frac{1}{0,1}} = \underline{0,17\ \text{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (12,999 + 12,182) = \underline{22,664\ \text{W/m}^2\text{K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0,9$

### 13.2.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{22,664}{1 + 0,0035 \cdot 22,664} = \underline{20,998\ \text{W/m}^2\text{K}}$$

**Teplo odebrané spalinám membránovými stěnami**

$$Q_{ms} = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 20,998 \cdot 67,12 \cdot 217,58 \cdot 10^{-3} = \underline{306,66\ \text{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{312,60 - 144,10}{\ln \frac{312,60}{144,10}} = \underline{217,58\ °\text{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 584,27 - 271,69 = \underline{312,60\ °\text{C}}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 415,78 - 271,69 = \underline{144,10\ °\text{C}}$$

## 13.3 Výpočet závěsných trubek

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr trubky | $D_{zt}$ | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | $t_{zt}$ | [m] | 0,0063 |
| vnitřní průměr trubky | $d_{zt}$ | [m] | 0,0254 |
| počet trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |

***Tab. 13.3.1*** *– Parametry závěsných trubek u P2*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_{zt1}$ | [°C] | 272,66 |
| teplota páry na výstupu | $t_{zt2}$ | [°C] | 274,26 |
| střední teplota páry | $t_{ztstř}$ | [°C] | 273,46 |
| měrný objem na vstupu | $v_{zt1}$ | [m$^3$/kg] | 0,03497 |
| měrný objem na výstupu | $v_{zt2}$ | [m$^3$/kg] | 0,03526 |
| střední měrný objem | $v_{ztstř}$ | [m$^3$/kg] | 0,03511 |

***Tab. 13.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek u P2*

### 13.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0580}{0{,}0254} \cdot \left(\frac{16{,}85 \cdot 0{,}0254}{6{,}47 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1{,}446^{0,4} = \underline{2683{,}566\ W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0{,}0254^2}{4} \cdot 32 = \underline{0{,}016\ m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{zt\,stř}}{F_p} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}03511}{0{,}016} = \underline{16{,}85\ m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0580$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 6{,}47 \cdot 10^{-7}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 1,446 |

### 13.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekcí uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = \underline{50{,}536\ W/m^2K}$$

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}172 \cdot 773{,}17^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{546{,}61}{773{,}17}\right)^4}{1-\frac{546{,}61}{773{,}17}} = \underline{10{,}451\ W/m^2K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + t_{ztstř} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S_{zt}} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273{,}15 + 273{,}46 + \left(0{,}003 + \frac{1}{2683{,}566}\right) \cdot \frac{101{,}55}{21{,}584} \cdot 10^3 = \underline{546{,}61\ K}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}003$ m$^2$·K/W | [m$^2$·K/W] |

**Potřebné teplo pro závěsné trubky**

$$Q_{zt} = \underline{101{,}55\,\mathrm{kW}}$$

**Teplosměnná plocha závěsných trubek**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p2} = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 32 \cdot 5{,}65 = \underline{21{,}58\,\mathrm{m}^2}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-7{,}860{,}100{,}24} = \underline{0{,}172}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}24}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{773{,}17}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{7{,}86\,\mathrm{m}^{-1} \cdot \mathrm{MPa}^{-1}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\,\mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}1 \cdot 0{,}09}{0{,}038^2} - 1 \right) = \underline{0{,}24\,\mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (50{,}536 + 10{,}451) = \underline{54{,}888\,\mathrm{W/m^2K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

### 13.3.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0{,}6 \cdot 54{,}888 = \underline{32{,}933\,\mathrm{W/m^2K}}$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 32{,}933 \cdot 21{,}58 \cdot 215{,}92 \cdot 10^{-3} = \underline{153{,}48\,\mathrm{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{310{,}01 - 143{,}12}{\ln \frac{310{,}01}{143{,}12}} = \underline{215{,}92\,°\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 584{,}27 - 274{,}26 = \underline{310{,}01\,°C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 415{,}78 - 272{,}66 = \underline{143{,}12\,°C}$$

## 13.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 2. části III. tahu

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp2} - Q_{ms} - Q_{zt} = 9149{,}10 - 2484{,}98 - 306{,}66 - 153{,}48 = \underline{6203{,}97\,kW}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin z 1. části III. tahu.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

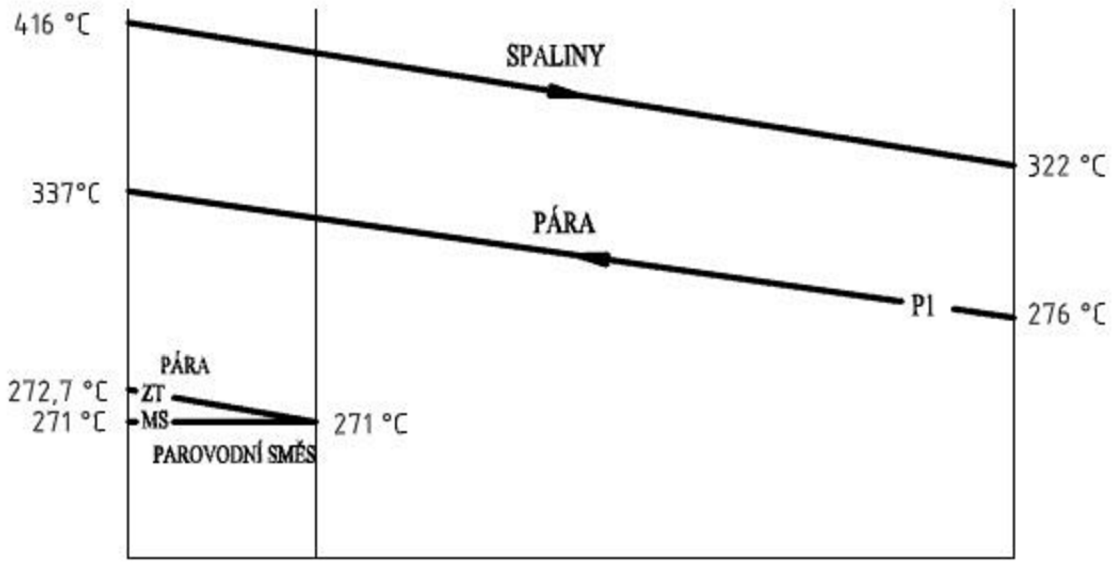
$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{6203{,}97}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{608{,}00\,kJ/m^3}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{415{,}88\,°C}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované liší o 0,1 ºC. Tento rozdíl je přijatelný.

# 14 Výpočet III. tahu – III. část a IV. tahu

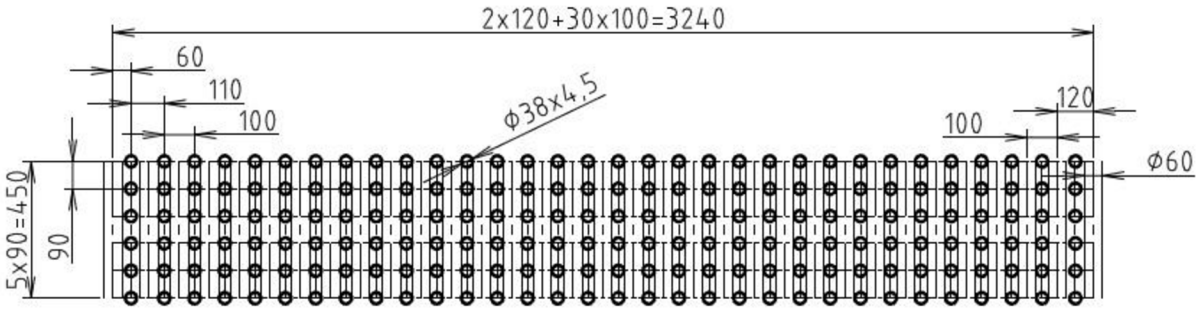
Při výpočtu III. části ve III. tahu a části ve IV. tahu uvažujeme s trubkovým svazkem přehříváku 2. Dále s membránovými stěnami a závěsnými trubkami, které zaujímají prostor výšky části přehříváku 2, která je ve III. tahu, a výšky kontrolního vlezu mezi přehřívákem 2 a přehřívákem 1. Převážná část přehříváku 2 se nachází ve IV. tahu z toho důvodu, protože výška III. tahu je omezena danou výškou výsypky.



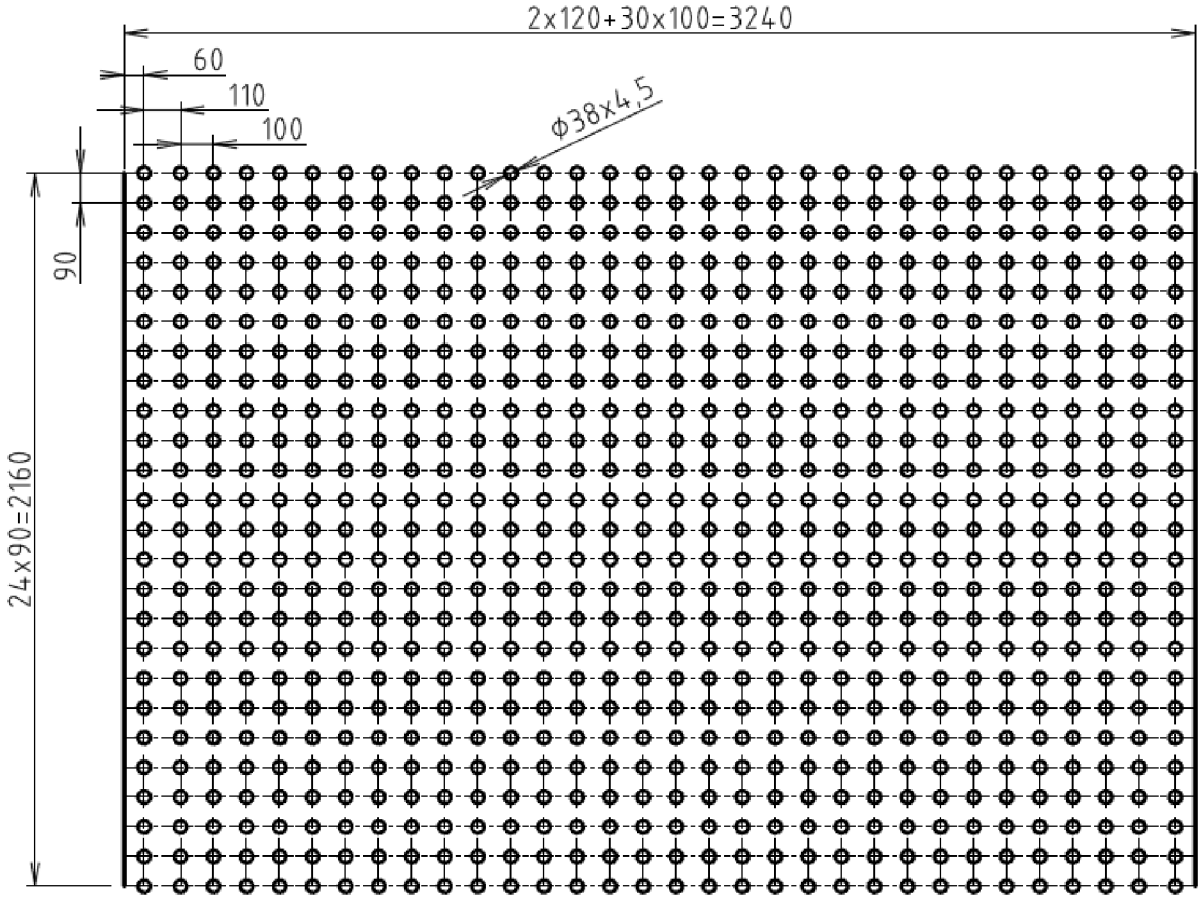

***Obr. 14.1*** *– Tepelné schéma III. části III. tahu a IV. tahu*

## 14.1 Přehřívák 1

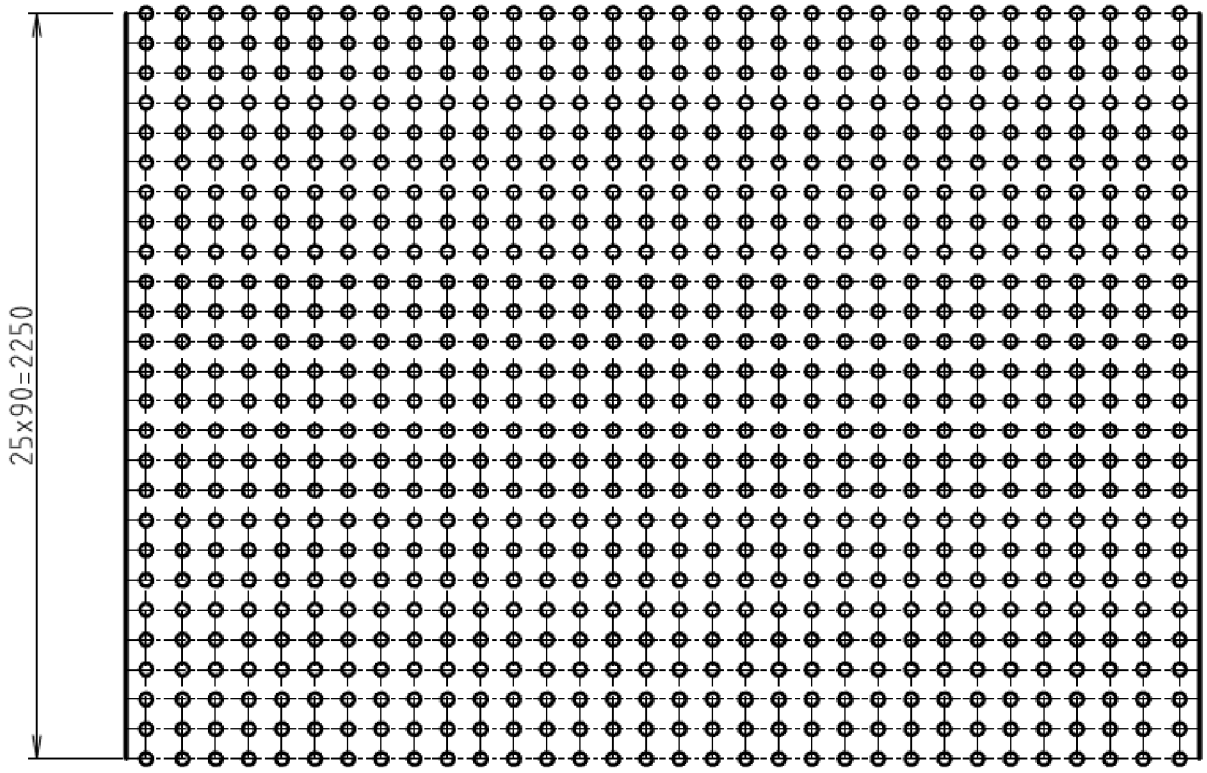
Přehřívák 1 je trubkový svazek, který je tvořen hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4,5 mm. Tento svazek se skládá ze čtyř částí. První se nachází ve III. tahu, zbylé části jsou umístěny ve IV. tahu, kde už nejsou membránové stěny a závěsné trubky. Druhá a třetí část mají stejné rozměry.




***Obr. 14.1.1*** *– Rozměry přehříváku 1, první část*




***Obr. 14.1.2*** *– Rozměry přehříváku 1, druhá a třetí část*




***Obr. 14.1.3*** *– Rozměry přehříváku 1, čtvrtá část*

**Parametry**

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr | D | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | t | [m] | 0,0045 |
| vnitřní průměr | d | [m] | 0,029 |
| příčná rozteč | $s_1$ | [m] | 0,1 |
| podélná rozteč | $s_2$ | [m] | 0,09 |
| počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ | [-] | 32 |
| počet řad | $n_{řad}$ | [-] | 82 |
| počet hadů | $n_h$ | [-] | 1 |
| počet závěsných trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |
| hloubka III. tahu a IV. tahu | $b_{III}$ | [m] | 2,7 |
| šířka III. tahu | a | [m] | 3,24 |

***Tab. 14.1.1** – Parametry trubek přehříváku 1*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_1$ | [°C] | 276,26 |
| teplota páry na výstupu | $t_2$ | [°C] | 337,25 |
| střední teplota páry | $t_{12}$ | [°C] | 306,75 |
| tlak páry na vstupu | $p_1$ | [MPa] | 5,6 |
| tlak páry na výstupu | $p_2$ | [MPa] | 5,4 |
| střední tlak páry | $p_{12}$ | [MPa] | 5,5 |
| měrný objem na vstupu | $v_1$ | [$m^3$/kg] | 0,03586 |
| měrný objem na výstupu | $v_2$ | [$m^3$/kg] | 0,04614 |
| střední měrný objem | $v_{12}$ | [$m^3$/kg] | 0,04100 |
| průtočné množství páry | $M_{pp}$ | [kg/s] | 7,75 |

***Tab. 14.1.2** – Parametry páry přehříváku 1*

| Parametry spalin | | | |
|---|---|---|---|
| teplota spalin na vstupu | $t_{sp1}$ | [°C] | 415,88 |
| teplota spalin na výstupu | $t_{sp2}$ | [°C] | 320,24 |
| entalpie spalin na vstupu | $i_{sp1}$ | [kJ/$m^3$] | 608,00 |
| entalpie spalin na výstupu | $i_{sp2}$ | [kJ/$m^3$] | 444,08 |

***Tab. 14.1.3** – Parametry spalin přehříváku 1*

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{584{,}27 + 415{,}78}{2} = \underline{500{,}02\,°C}$$

**Předpokládaná plocha části A u přehříváku 1 (III. tah)**

$$S_a = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 2{,}7 \cdot 32 \cdot 6 \cdot 1 = \underline{61{,}89\,m^2}$$

**Předpokládaná plocha části B u přehříváku 1 (IV. tah)**

$$S_b = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 2{,}7 \cdot 32 \cdot 76 \cdot 1 = \underline{783{,}90\,m^2}$$

**Předpokládaná plocha celého svazku**

$$S = S_a + S_b = 61{,}89 + 783{,}90 = \underline{845{,}79\,m^2}$$

### 14.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0546}{0{,}029} \cdot \left(\frac{15{,}03 \cdot 0{,}029}{8{,}3 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1{,}196^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = \underline{1754{,}78\ W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0{,}029^2}{4} \cdot 32 \cdot 1 = \underline{0{,}02114\ m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}04100}{0{,}02114} = \underline{15{,}03\ m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0546$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 8{,}3 \cdot 10^{-7}$ m²/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 1,196 |

### 14.1.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou**

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

$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}055}{0{,}038} \cdot \left(\frac{4{,}38 \cdot 0{,}038}{5{,}59 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \cdot 0{,}652^{0,33} = \underline{45{,}783\ W/m^2K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{5{,}46} \cdot \frac{273{,}15 + 368{,}06}{273{,}15} = \underline{4{,}38\ m/s}$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 2{,}7 \cdot (3{,}24 - 32 \cdot 0{,}038) = \underline{5{,}46\ m^2}$$

**Oprava na uspořádání svazku $c_s$**

V závislosti na poměrné příčné rozteči $\sigma_1$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0{,}1}{0{,}038} = \underline{2{,}63}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0{,}09}{0{,}038} = \underline{2{,}37}$$

Pokud je $\sigma_2 \geq 2$, potom $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad $c_z$**

Pokud je počet řad $\geq 10$, potom $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0553$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 5{,}59 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,652 |

**Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}183 \cdot 641{,}21^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{585{,}29}{641{,}21}\right)^4}{1-\frac{585{,}29}{641{,}21}} = \underline{8{,}669\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p3}}{S} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273{,}15 + 306{,}75 + \left(0{,}002 + \frac{1}{1754{,}778}\right) \cdot \frac{1643}{845{,}79} \cdot 10^3 = \underline{585{,}29\ \mathrm{K}}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}002$ m$^2$·K/W | [m$^2$·K/W] |

**Potřebné teplo pro přehřívák 1**

$$Q_{p1} = \underline{1643\ \mathrm{kW}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-8{,}400{,}100{,}24} = \underline{0{,}183}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}24}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{641{,}21}{1000}\right) \cdot 0{,}2851 = \underline{8{,}40\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}1 \cdot 0{,}09}{0{,}038^2} - 1 \right) = \underline{0{,}24\ \mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 45{,}783 + 8{,}669 = \underline{54{,}452\ \mathrm{W/m^2K}}$$

### 14.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0{,}6 \cdot 54{,}452}{1 + \frac{54{,}452}{1754{,}778}} = \underline{31{,}688\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 1**

$$S_{id} = \frac{Q_{p1}}{k \cdot \Delta t} \cdot 1000 = \frac{1643}{31{,}688 \cdot 59{,}64} \cdot 1000 = \underline{869{,}43\ \mathrm{m^2}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{78{,}63 - 43{,}98}{\ln \frac{78{,}63}{43{,}98}} = \underline{59{,}64\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 415{,}88 - 337{,}25 = \underline{78{,}63\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 320{,}24 - 276{,}26 = \underline{43{,}98\ °\mathrm{C}}$$

**Skutečně odebrané teplo přehřívákem 1**

$$Q_{skp1} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 31{,}688 \cdot 845{,}79 \cdot 59{,}64 \cdot 10^{-3} = \underline{1598{,}33\ \mathrm{kW}}$$

Předpokládaná plocha svazku je 845,79 m$^2$, liší se od potřebné teplosměnné plochy, která je 869,43 m$^2$, o 2,79 %. Tento rozdíl je přijatelný.

**Výška prostoru části A přehříváku 1 v III. tahu**

Včetně potřebného otvoru pro vlez, mezi přehřívákem 2 a přehřívákem 1.

$$h_{p1} = c - c_{výs} - h_{p3} - h_{p2} = 13{,}5 - 4{,}5 - 2{,}01 - 5{,}65 = \underline{1{,}34\ \mathrm{m}}$$

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}04100}{15{,}03} = \underline{0{,}0317\ \mathrm{m^2}}$$

**Průměr komor**

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}0317}{\pi}} = \underline{0{,}201\ \mathrm{m}}$$

Volím trubku TR 219x6,3 ČSN 42 5715.01

## 14.2 Výpočet membránových stěn

### 14.2.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

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

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0553}{0{,}212} \cdot \left(\frac{4{,}38 \cdot 0{,}212}{5{,}59 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,8} \cdot 0{,}652^{0,4} = \underline{12{,}034\ W/m^2K}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 5{,}46}{103{,}32} = \underline{0{,}212\ m}$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D$$

$$O = 2 \cdot (3{,}24 + 2{,}7) + 32 \cdot (2{,}7 + 0{,}038) + 32 \cdot \pi \cdot 0{,}038 = \underline{103{,}32\ m}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0553$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 5{,}59 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,652 |

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}154 \cdot 641{,}21^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{667{,}39}{641{,}21}\right)^4}{1 - \frac{667{,}39}{641{,}21}} = \underline{8{,}851\ W/m^2K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273{,}15 + (271{,}69 + 0{,}0035 \cdot 112638) = \underline{667{,}39\ K}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | součinitel zanesení výhřevné plochy<br>dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}0035$ m$^2$·K/W | [m$^2$·K/W] |

**Měrné zatížení**

Určí se z předběžného tepla, které odevzdají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{2 \cdot h_{p1} \cdot (a + b_{III})} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858 \cdot 163{,}93}{2 \cdot 1{,}34 \cdot (3{,}24 + 2{,}7)} \cdot 10^3 = \underline{112638\ \mathrm{W/m^2}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp}^{415} - I_{sp}^{320} = 608{,}00 - 444{,}08 = \underline{163{,}93\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-10{,}240{,}100{,}16} = \underline{0{,}154}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left( \frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}16}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0{,}37 \cdot \frac{641{,}21}{1000} \right) \cdot 0{,}2851 = \underline{10{,}24\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\ \mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = \frac{1{,}8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p1}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1{,}8}{\frac{1}{2{,}7} + \frac{1}{1{,}34} + \frac{1}{0{,}1}} = \underline{0{,}16\ \mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (12{,}034 + 8{,}851) = \underline{18{,}797\ \mathrm{W/m^2K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

### 14.2.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{18{,}797}{1 + 0{,}0035 \cdot 18{,}797} = \underline{17{,}636\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Teplo odebrané spalinám membránovými stěnami**

$$Q_{ms} = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 17{,}636 \cdot 14{,}85 \cdot 87{,}50 \cdot 10^{-3} = \underline{28{,}98\ \mathrm{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{143{,}22 - 48{,}54}{\ln \frac{143{,}22}{48{,}54}} = \underline{87{,}50\,°C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 415{,}88 - 271{,}69 = \underline{143{,}22\,°C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 320{,}24 - 271{,}69 = \underline{48{,}54\,°C}$$

## 14.3 Výpočet závěsných trubek

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr trubky | $D_{zt}$ | [m] | 0,038 |
| tloušťka stěny | $t_{zt}$ | [m] | 0,0063 |
| vnitřní průměr trubky | $d_{zt}$ | [m] | 0,0254 |
| počet trubek | $n_{zt}$ | [-] | 32 |

***Tab. 14.3.1*** *– Parametry závěsných trubek pro první část P1*

| Parametry páry | | | |
|---|---|---|---|
| teplota páry na vstupu | $t_{zt1}$ | [°C] | 271,70 |
| teplota páry na výstupu | $t_{zt2}$ | [°C] | 272,66 |
| střední teplota páry | $t_{ztstř}$ | [°C] | 272,18 |
| měrný objem na vstupu | $v_{zt1}$ | [$m^3$/kg] | 0,03480 |
| měrný objem na výstupu | $v_{zt2}$ | [$m^3$/kg] | 0,03497 |
| střední měrný objem | $v_{ztstř}$ | [$m^3$/kg] | 0,03489 |

***Tab. 14.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek pro první část P1*

### 14.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0582}{0{,}0254} \cdot \left(\frac{16{,}72 \cdot 0{,}0254}{6{,}41 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1{,}467^{0,4} = \underline{2715{,}658\ W/m^2K}$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0{,}0254^2}{4} \cdot 32 = \underline{0{,}016\ m^2}$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{ztstř}}{F_p} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}03489}{0{,}016} = \underline{16{,}72\ m/s}$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0582$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 6{,}41 \cdot 10^{-7}$ $m^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 1,467 |

### 14.3.2 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**Konvekcí pro podélné proudění**

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekcí uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = \underline{45{,}783\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Sáláním pro zaprášené spaliny**

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

$$\alpha_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8+1}{2} \cdot 0{,}183 \cdot 641{,}21^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{545{,}33}{641{,}21}\right)^4}{1-\frac{545{,}33}{641{,}21}} = \underline{7{,}884\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273{,}15 + t_{ztstř} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S_{zt}} \cdot 10^3$$

$$T_z = 273{,}15 + 272{,}18 + \left(0{,}003 + \frac{1}{2715{,}658}\right) \cdot \frac{182{,}76}{4{,}77} \cdot 10^3 = \underline{545{,}33\ \mathrm{K}}$$

$\varepsilon$ součinitel zanesení výhřevné plochy $[m^2 \cdot K/W]$
dle konzultací voleno $\varepsilon = 0{,}003\ m^2 \cdot K/W$

**Potřebné teplo pro závěsné trubky**

$$Q_{zt} = \underline{182{,}76\ \mathrm{kW}}$$

**Teplosměnná plocha závěsných trubek**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p1} = \pi \cdot 0{,}038 \cdot 32 \cdot 1{,}34 = \underline{4{,}77\ \mathrm{m^2}}$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-8{,}400{,}100{,}24} = \underline{0{,}183}$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

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

$$k = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot 0{,}1593}{3{,}16 \cdot \sqrt{0{,}0285 \cdot 0{,}24}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{641{,}21}{1000}\right) \cdot 0{,}2851 = \underline{8{,}40\ \mathrm{m^{-1} \cdot MPa^{-1}}}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0{,}1 \cdot 0{,}2851 = \underline{0{,}0285\,\mathrm{MPa}}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 0{,}9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0{,}9 \cdot 0{,}038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}1 \cdot 0{,}09}{0{,}038^2} - 1\right) = \underline{0{,}24\,\mathrm{m}}$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0{,}9 \cdot (45{,}783 + 7{,}884) = \underline{48{,}300\,\mathrm{W/m^2K}}$$

$\xi$ součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou
dle konzultací voleno $\xi = 0{,}9$

### 14.3.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0{,}6 \cdot 54{,}888 = \underline{28{,}980\,\mathrm{W/m^2K}}$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 28{,}980 \cdot 4{,}78 \cdot 87{,}50 \cdot 10^{-3} = \underline{12{,}11\,\mathrm{kW}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{143{,}22 - 48{,}54}{\ln \frac{143{,}22}{48{,}54}} = \underline{87{,}50\,°\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 415{,}88 - 272{,}66 = \underline{143{,}22\,°\mathrm{C}}$$
$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 320{,}24 - 271{,}70 = \underline{48{,}54\,°\mathrm{C}}$$

## 14.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z III. části III. tahu a části IV. tahu

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp2} - Q_{ms} - Q_{zt} = 6203{,}97 - 1598{,}33 - 23{,}01 - 12{,}11 = \underline{4570{,}52\,\mathrm{kW}}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin z 2. části III. tahu.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{4570{,}52}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{447{,}92\,\mathrm{kJ/m^3}}$$
$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{322{,}48\,°\mathrm{C}}$$

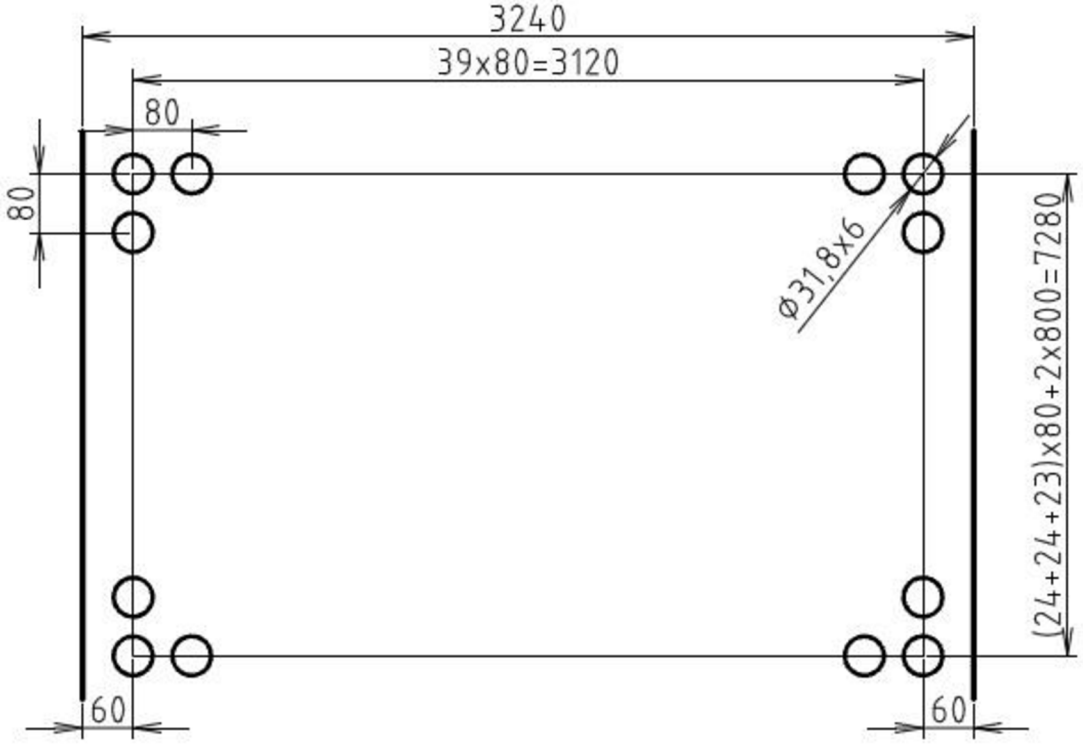
Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované liší o 2,24 °C. Tento rozdíl je přijatelný.

# 15 Výpočet IV. a V. tahu

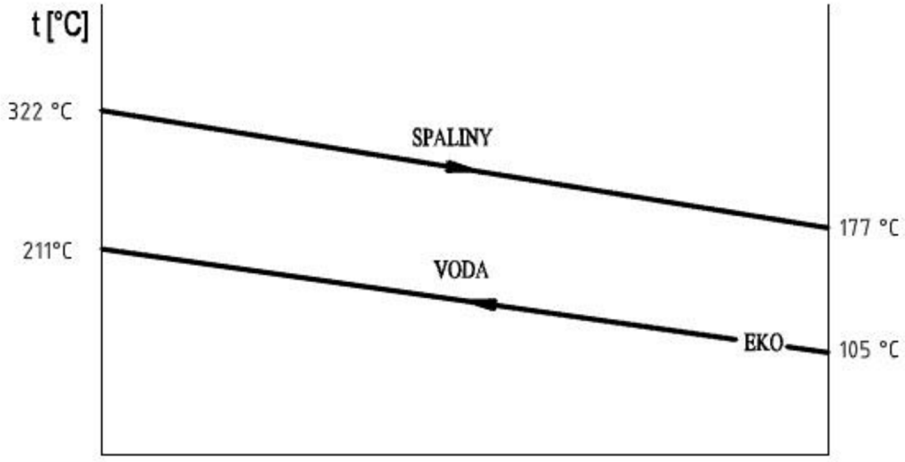
Tyto tahy jsou nechlazené, nachází se v nich kromě části přehříváku 1 i svazky ekonomizéru a ohříváku vzduchu.

## 15.1 Ekonomizér

Ekonomizér je konstruován z trubek o vnějším průměru 31,8 mm a o tloušťce stěny 6 mm. Jsou naohýbané do prostoru tak, že zabírají dvojnásobný počet trubek v jedné řadě, tedy $n_{tr} = 40$. Skládá se ze tří částí, mezi kterými se nacházejí dva kontrolní vlezy. Spaliny nemají tolik tepla, které by bylo potřeba na ohřátí vody na mez sytosti vody/páry ve výparníku. Nedohřev vody vychází na 62 ºC.




***Obr. 15.1.1*** *– Rozměry ekonomizéru*




***Obr. 15.1.2*** *– Tepelné schéma ekonomizéru*

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr | D | [m] | 0,0318 |
| tloušťka stěny | t | [m] | 0,006 |
| vnitřní průměr | d | [m] | 0,0198 |
| příčná rozteč | $s_1$ | [m] | 0,08 |
| podélná rozteč | $s_2$ | [m] | 0,08 |
| počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ | [-] | 40 |
| počet řad | $n_{řad}$ | [-] | 74 |
| hloubka IV. tahu | $b_{III}$ | [m] | 2,7 |
| šířka IV. tahu | a | [m] | 3,24 |

***Tab. 15.1.1*** *– Parametry trubek ekonomizéru*

| Parametry vody | | | |
|---|---|---|---|
| teplota vody na vstupu | $t_1$ | [°C] | 105,00 |
| teplota vody na výstupu | $t_2$ | [°C] | 210,58 |
| střední teplota vody | $t_{12}$ | [°C] | 157,79 |
| tlak vody na vstupu | $p_1$ | [MPa] | 6,05 |
| tlak vody na výstupu | $p_2$ | [MPa] | 5,65 |
| střední tlak vody | $p_{12}$ | [MPa] | 5,85 |
| měrný objem na vstupu | $v_1$ | [$m^3$/kg] | 0,0010 |
| měrný objem na výstupu | $v_2$ | [$m^3$/kg] | 0,0012 |
| střední měrný objem | $v_{12}$ | [$m^3$/kg] | 0,0011 |
| průtočné množství páry | $M_{pp}$ | [kg/s] | 7,75 |

***Tab. 15.1.2*** *– Parametry vody v ekonomizéru*

| Parametry spalin | | | |
|---|---|---|---|
| teplota spalin na vstupu | $t_{sp1}$ | [°C] | 322,48 |
| teplota spalin na výstupu | $t_{sp2}$ | [°C] | 176,57 |
| entalpie spalin na vstupu | $i_{sp1}$ | [kJ/$m^3$] | 447,92 |
| entalpie spalin na výstupu | $i_{sp2}$ | [kJ/$m^3$] | 197,83 |

***Tab. 15.1.3*** *– Parametry spalin v ekonomizéru*

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{322{,}48 + 176{,}57}{2} = \underline{249{,}53\,°C}$$

**Průtočný průřez pro vodu**

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0{,}0198^2}{4} \cdot 40 = \underline{0{,}0123\,m^2}$$

**Rychlost proudění vody v trubkách**

$$w_v = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_v} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}0011}{0{,}0123} = \underline{0{,}70\,m/s}$$

### 15.1.1 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

Pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou.

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

$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}045}{0{,}0318} \cdot \left(\frac{3{,}59 \cdot 0{,}0318}{3{,}92 \cdot 10^{-5}}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}660^{0{,}33} = \underline{43{,}842\ W/m^2K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{5{,}44} \cdot \frac{273{,}15 + 249{,}53}{273{,}15} = \underline{3{,}59\ m/s}$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{IV} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 2{,}7 \cdot (3{,}24 - 40 \cdot 0{,}038) = \underline{5{,}44\ m^2}$$

**Oprava na uspořádání svazku $c_s$**

V závislosti na poměrné příčné rozteči $\sigma_1$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0{,}08}{0{,}0318} = \underline{2{,}52}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0{,}08}{0{,}0318} = \underline{2{,}52}$$

Pokud je $\sigma_2 \geq 2$, potom $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad $c_z$**

Pokud je počet řad $\geq 10$, potom $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0448$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 3{,}92 \cdot 10^{-5}$ m²/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,660 |

### 15.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny

Svazky ekonomizéru se nacházejí v oblasti, kde je teplota spalin pod 500 ºC. Proto se součinitel přestupu tepla sáláním zanedbává.

### 15.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_k} = \frac{43{,}842}{1 + 0{,}0045 \cdot 43{,}842} = \underline{36{,}618\ W/m^2K}$$

**Potřebná (ideální) plocha pro ekonomizér**

$$S_{id} = \frac{Q_e}{k \cdot \Delta t} \cdot 1000 = \frac{2597}{36{,}618 \cdot 90{,}24} \cdot 1000 = \underline{768{,}85\ m^2}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{111{,}90 - 71{,}57}{\ln \frac{111{,}90}{71{,}57}} = \underline{90{,}24\,°C}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 322{,}48 - 210{,}58 = \underline{111{,}90\,°C}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 176{,}57 - 105{,}00 = \underline{71{,}57\,°C}$$

**Počet řad ekonomizéru**

$$n_{řad} = \frac{S_{id}}{\pi \cdot D \cdot b_{IV} \cdot n_{tr}} = \frac{786{,}12}{\pi \cdot 0{,}0318 \cdot 2{,}7 \cdot 40} = \underline{72{,}86}$$

$$\Rightarrow n_{řad} = \underline{74}$$

**Skutečná výrobní teplosměnná plocha ekonomizéru**

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{IV} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} = \pi \cdot 0{,}0318 \cdot 2{,}6 \cdot 40 \cdot 74 = \underline{768{,}85\,m^2}$$

Výrobní teplosměnná plocha se liší od ideální o 2,19 %.

**Skutečně odebrané teplo ekonomizérem**

$$Q_{esk} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 36{,}618 \cdot 768{,}85 \cdot 90{,}24 \cdot 10^{-3} = \underline{2540{,}54\,kW}$$

### 15.1.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z ekonomizéru

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{esk} = 4570{,}52 - 2540{,}54 = \underline{2029{,}98\,kW}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin, které vystupují z přehříváku 1.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{2029{,}98}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{198{,}94\,kJ/m^3}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{177{,}22\,°C}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované liší o 0,65 ºC. Tento rozdíl je přijatelný.

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_v} = \frac{7{,}75 \cdot 0{,}01111}{0{,}70} = \underline{0{,}018\,m^2}$$

**Průměr komor**

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}018}{\pi}} = \underline{0{,}153\,m}$$

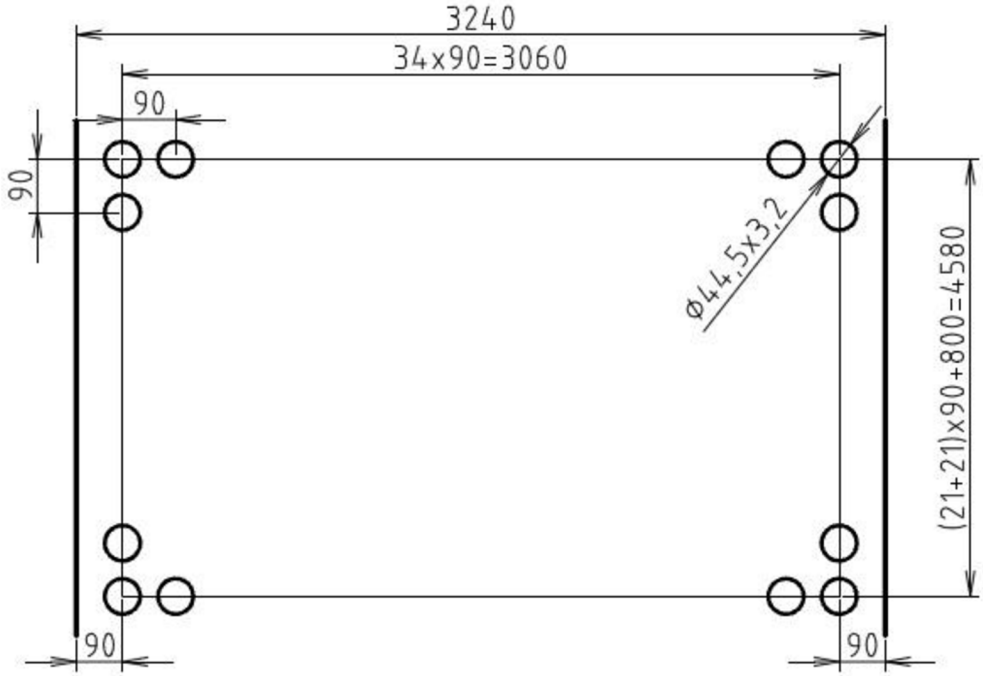
Volím trubku TR 168,3x6,3 ČSN 42 5715.01

## 15.2 Ohřívák vzduchu

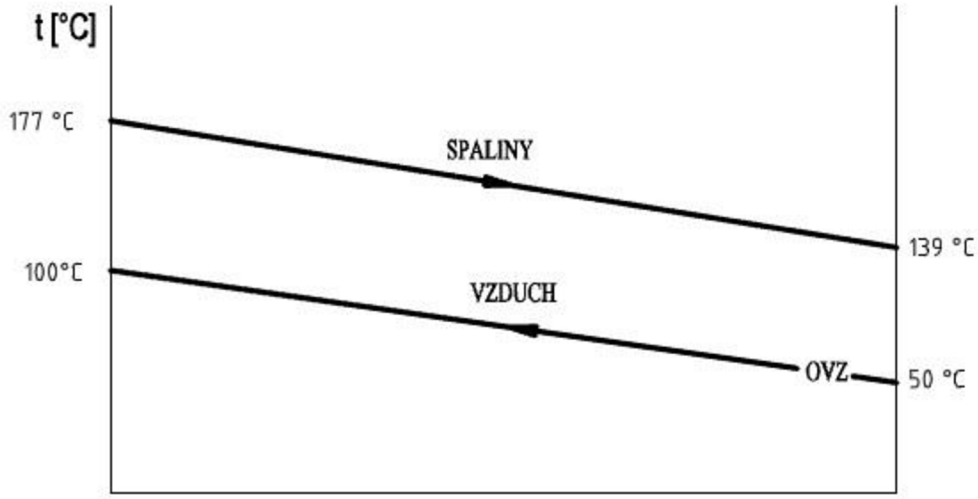
Ohřívák vzduchu je trubkový svazek, který je tvořen hladkými trubkami o vnějším průměru 44,5 mm a tloušťce stěny 3,2 mm. Tento svazek se skládá ze dvou částí.

Na základě konzultací je primární i sekundární vzduch přiváděný do spalovací komory předehříván na 100 ºC. Primární a sekundární vzduch tvoří 90 % z celkového množství přiváděného vzduchu. Zbylých 10 % je bráno na pohazování směsi paliva na rošt. Jelikož se uvažuje s recirkulací vzduchu, aby nedošlo k podkročení rosného bodu v zimním období, asi 10 % z celkového množství přivedeného vzduchu, tak se ve výpočtech uvažuje původních 100 % přiváděného vzduchu. Při recirkulaci vzduchu je vstupní teplota vzduchu do ohříváku vzduchu 50 ºC.

Spaliny za ohřívákem vzduchu by neměli podkročit teplotu 140 ºC, aby teplota neklesla pod rosný bod spalin a nehrozila nízkoteplotní koroze.




***Obr. 15.2.1*** *– Rozměry ohříváku vzduchu*




***Obr. 15.2.2*** *– Tepelné schéma ohříváku vzduchu*

| Parametry trubek | | | |
|---|---|---|---|
| vnější průměr | D | [m] | 0,0445 |
| tloušťka stěny | t | [m] | 0,0032 |
| vnitřní průměr | d | [m] | 0,0381 |
| příčná rozteč | $s_1$ | [m] | 0,09 |
| podélná rozteč | $s_2$ | [m] | 0,09 |
| počet trubek v jedné řadě | $n_{tr}$ | [-] | 35 |
| počet řad | $n_{řad}$ | [-] | 44 |
| hloubka IV. a V. tahu | $b_{IV}$ | [m] | 2,7 |
| šířka IV. a V. tahu | a | [m] | 3,24 |

***Tab. 15.2.1** – Parametry trubek ohříváku vzduchu*

| Parametry vzduchu | | | |
|---|---|---|---|
| teplota vzduchu na vstupu | $t_1$ | [°C] | 50 |
| teplota vzduchu na výstupu | $t_2$ | [°C] | 100 |
| střední teplota vzduchu | $t_{12}$ | [°C] | 75 |
| entalpie vzduchu na vstupu | $i_1$ | [kJ/kg] | 212,31 |
| entalpie vzduchu na výstupu | $i_2$ | [kJ/kg] | 484,79 |

***Tab. 15.2.2** – Parametry vzduchu v OVZ*

| Parametry spalin | | | |
|---|---|---|---|
| teplota spalin na vstupu | $t_{sp1}$ | [°C] | 177,22 |
| teplota spalin na výstupu | $t_{sp2}$ | [°C] | 139,81 |
| entalpie spalin na vstupu | $i_{sp1}$ | [kJ/m$^3$] | 198,94 |
| entalpie spalin na výstupu | $i_{sp2}$ | [kJ/m$^3$] | 134,82 |

***Tab. 15.2.3** – Parametry spalin v OVZ*

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{177{,}22 + 139{,}94}{2} = \underline{158{,}51\,°C}$$

**Potřebný tepelný výkon ohříváku vzduchu**

$$Q_{ovz} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot (i_2 - i_1) = 1{,}86 \cdot 1{,}3 \cdot (484{,}79 - 212{,}31) = \underline{658{,}08\,kW}$$

### 15.2.1 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

Pro uspořádání trubek za sebou.

$$\alpha_k^{vz} = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m$$

$$\alpha_k^{vz} = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}03}{0{,}0381} \cdot \left(\frac{6{,}51 \cdot 0{,}0381}{2{,}07 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,8} \cdot 0{,}693^{0,4} \cdot 0{,}8 \cdot 1 \cdot 1 = \underline{28{,}640\,W/m^2K}$$

**Rychlost vzduchu**

$$w_{vz} = \frac{V_v}{F_v} \cdot \frac{273{,}15 + t_{12}}{273{,}15} = \frac{8{,}97}{1{,}76} \cdot \frac{273{,}15 + 75}{273{,}15} = \underline{6{,}51\,m/s}$$

**Světlý průřez vzduchu**

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} = \frac{\pi \cdot 0{,}0381^2}{4} \cdot 35 \cdot 44 = \underline{1{,}76\,m^2}$$

**Objemový průtok vzduchu**

$$V_v = M_{pv} \cdot \alpha \cdot O_{VZmin} = 1{,}86 \cdot 1{,}3 \cdot 3{,}71 = \underline{8{,}97\,m^3/s}$$

**Opravný koeficient $c_t$**

$$c_t = \left(\frac{t_{12}}{t_{st}}\right)^{0,5} = \left(\frac{75}{116{,}76}\right)^{0,5} = \underline{0{,}80}$$

**Teplota stěny**

$$t_{st} = \frac{t_{12} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{75 + 158{,}51}{2} = \underline{116{,}76\,°C}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}03$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 2{,}07 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,693 |

### 15.2.2 Součinitele přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

Pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou.

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

$$\alpha_k^{sp} = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}0367}{0{,}0445} \cdot \left(\frac{3{,}43 \cdot 0{,}0445}{2{,}79 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \cdot 0{,}680^{0,33} = \underline{39{,}087\,W/m^2K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273{,}15 + t_{stř}}{273{,}15} = \frac{5{,}492 \cdot 1{,}858}{4{,}70} \cdot \frac{273{,}15 + 158{,}51}{273{,}15} = \underline{3{,}43\,m/s}$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{IV} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 2{,}7 \cdot (3{,}24 - 35 \cdot 0{,}0445) = \underline{4{,}70\,m^2}$$

**Oprava na uspořádání svazku $c_s$**

V závislosti na poměrné příčné rozteči $\sigma_1$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0{,}09}{0{,}0445} = \underline{2{,}02}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0{,}09}{0{,}0445} = \underline{2{,}02}$$

Pokud je $\sigma_2 \geq 2$, potom $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad $c_z$**

Pokud je počet řad $\geq 10$, potom $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin**

| | |
|---|---|
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda = 0{,}0367$ W/mK |
| Kinematická viskozita | $\nu = 2{,}79 \cdot 10^{-5}$ m$^2$/s |
| Prandtlovo číslo | Pr = 0,680 |

### 15.2.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_k^v \cdot \alpha_k^{sp}}{\alpha_k^v + \alpha_k^{sp}} = 0{,}85 \cdot \frac{28{,}640 \cdot 39{,}087}{28{,}640 + 39{,}087} = \underline{14{,}050\ \mathrm{W/m^2K}}$$

**Potřebná (ideální) plocha pro ekonomizér**

$$S_{id} = \frac{Q_e}{k \cdot \Delta t} \cdot 1000 = \frac{658{,}08}{14{,}050 \cdot 83{,}36} \cdot 1000 = \underline{561{,}93\ \mathrm{m^2}}$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{77{,}22 - 89{,}81}{\ln \frac{77{,}22}{89{,}81}} = \underline{83{,}36\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 177{,}22 - 100{,}00 = \underline{77{,}22\ °\mathrm{C}}$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 139{,}81 - 50{,}00 = \underline{89{,}81\ °\mathrm{C}}$$

**Skutečná výrobní teplosměnná plocha ohříváku vzduchu**

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{IV} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} = \pi \cdot 0{,}0445 \cdot 2{,}6 \cdot 35 \cdot 44 = \underline{559{,}76\ \mathrm{m^2}}$$

Výrobní teplosměnná plocha se liší od ideální o 0,39 %.

**Skutečně odebrané teplo ohřívákem vzduchu**

$$Q_{ovzsk} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 14{,}050 \cdot 559{,}76 \cdot 83{,}36 \cdot 10^{-3} = \underline{655{,}54\ \mathrm{kW}}$$

### 15.2.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z ohříváku vzduchu

**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{ovzsk} = 2029{,}98 - 655{,}54 = \underline{1374{,}44\ \mathrm{kW}}$$

Teplo vstupních spalin $Q_{sp1}$ je rovno teplu výstupních spalin ekonomizéru.

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{1374{,}44}{5{,}492 \cdot 1{,}858} = \underline{134{,}70\ \mathrm{kJ/m^3}}$$

$$\Rightarrow t_{sp2} = \underline{139{,}74\ °\mathrm{C}}$$

Skutečná teplota výstupních spalin se od odhadované liší o 0,07 °C. Tento rozdíl je přijatelný.

# 16 Kontrola tepelné bilance

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_k - \Sigma Q_i \cdot \left(1 - \frac{\xi_{MN}}{100}\right) = 14043{,}35 \cdot 0{,}9023 - 12643{,}40 \cdot \left(1 - \frac{1{,}80}{100}\right) = \underline{28{,}33\ \text{kJ/kg}}$$

$$\Delta = \left(\frac{\Delta Q}{Q_p^p}\right) \cdot 100 = \left(\frac{28{,}33}{14043{,}35}\right) = \underline{0{,}202\ \%}$$

| | |
|---|---|
| $Q_p^p$ | teplo přivedené do kotle |
| $\eta_k$ | tepelná účinnost |
| $\Sigma Q_i$ | teplo odevzdané všem výhřevným plochám |
| $\xi_{MN}$ | ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích |

**Teplo odevzdané všem výhřevným plochám**

$$\Sigma Q_i = \varphi \cdot (I_u - I_{sp2}^{ovz}) = 0{,}9871 \cdot (14184{,}47 - 1375{,}73) = \underline{12643{,}40\ \text{kJ/kg}}$$

| | |
|---|---|
| $\varphi$ | součinitel uchování tepla |
| $I_u$ | užitečné teplo uvolněné v ohništi |
| $I_{sp2}^{ovz}$ | entalpie spalin za ohřívákem vzduchu |

Při kontrole tepelné bilance by odchylka neměla přesáhnout 0,5 % z tepla přivedeného do kotle $Q_p^p$. V mém případě je odchylka 0,202 %, která podmínce vyhovuje.;

# 17 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout uspořádání ploch a jejich dimenzování, dále tepelný výpočet a výpočtový projekt pro kotel na spalování hnědého uhlí a dřeva o těchto parametrech:

- výkon kotle 30t/h
- tlak přehřáté páry 5 MPa
- teplota přehřáté páry 450°C
- teplota napájecí vody 105°C

Kotel je navržen jako pětitahový, kdy v prvním tahu – spalovací komoře probíhá spalování směsi paliva na roštu. Palivo je pohazováno na rošt vzduchem. Hnědé uhlí a dřevo ve formě štěpky jsou umístěné ve vlastním zásobníku, tyto paliva jsou dále dopravovány do směšovače, odkud jdou jako společná směs přes pohazovací zařízení na rošt.

Primární spalovací vzduch o teplotě 100 ºC je přiváděn ze spodu roštu, sekundární vzduch o teplotě 100 ºC je přiváděn pomocí dýz v několika úrovních v přední a zadní části spalovací komory. Mezi prvním a druhým tahem je umístěna mříž, druhý tah je navržen jako prázdný. Ve třetím tahu, který společně s prvním a druhým chlazený těsnými membránovými stěnami, jsou umístěné přehříváky. Přehříváky 3, 2 a část 1. jsou zavěšeny na závěsných trubkách.

Ve čtvrtém a pátém tahu, které jsou nechlazené, je umístěna část přehříváku 1, ekonomizér a ohřívák vzduchu. Mezi II. a III. tahem, dále mezi IV. a V. tahem, jsou obratové prostory tvořené výsypkami. Ve výsypce se spaliny zbavují části neseného popílku, tento odloučený popílek se vrací zpět do spalovací komory.

Jelikož výhřevnost paliva není stále stejná, dochází ke změně výstupní teploty páry. Proto jsou použity dva vstřiky napájecí vody mezi prvním a druhým přehřívákem, dále mezi druhým a třetím přehřívákem.

Výška trubkových svazků se pohybuje maximálně kolem 2 m, pak následuje mezera, ve které jsou umístěny parní ofukovače a kontrolní vlez. Parní ofukovače mají čistící funkci trubkových svazků od popílku.

# 18 Seznam použité literatury


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

[2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

[3] Podpora výroby elektřiny. *ERU: Energetický regulační úřad* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16].Dostupné z: http://www.eru.cz/

[4] ANDERT, David, KÁRA, Jaroslav, HUTLA, Petr: Společné spalování biomasy a uhlí. Biom.cz [online]. 2001-12-17 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spolecne-spalovani-biomasy-a-uhli>. ISSN: 1801-2655.

[5] Vyhláška o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů. In: 477/2012 Sb. 2012.

[6] HOLMGREN. X Steam: IAPWS IF97 Excel Steam Tables. version 2.6. 2006. Dostupné z: www.x-eng.com

# 19 Seznam obrázků

***Obr. 1.1*** *–Výroba elektřiny z OZE*
***Obr. 3.3.1*** *– I-t diagram vzduchu a spalin*
***Obr. 5.1*** *–Schéma spalovací komory*
***Obr. 5.1.1*** *– I-t diagram spalin*
***Obr. 6.1*** *– Pilový diagram (Q-t diagram)*
***Obr. 6.3.1*** *– Vstřik napájecí vody mezi P3 a P2*
***Obr. 6.4.1*** *– Vstřik napájecí vody mezi P2 a P1*
***Obr. 7.1*** *– Rozměry I. tahu*
***Obr. 7.2*** *– Tepelné schéma I. tahu*
***Obr. 8.1*** *– Schéma rozvolnění*
***Obr. 8.2.1*** *– Tepelné schéma mříže*
***Obr. 9.1*** *– Rozměry II. tahu*
***Obr. 9.2.1*** *– Tepelné schéma II. tahu*
***Obr. 11.1*** *– Rozměry výsypky*
***Obr. 11.2.1*** *– Tepelné schéma výsypky*
***Obr. 12.1*** *– Tepelné schéma I. části III. tahu*
***Obr. 12.1.1*** *– Rozměry přehříváku 3*
***Obr. 13.1*** *– Tepelné schéma II. části III. tahu*
***Obr. 13.1.1*** *– Rozměry přehříváku 2, první část*
***Obr. 13.1.2*** *– Rozměry přehříváku 2, druhá část*
***Obr. 14.1*** *– Tepelné schéma III. části III. tahu a IV. tahu*
***Obr. 14.1.1*** *– Rozměry přehříváku 1, první část*
***Obr. 14.1.2*** *– Rozměry přehříváku 1, druhá a třetí část*
***Obr. 14.1.3*** *– Rozměry přehříváku 1, čtvrtá část*
***Obr. 15.1.1*** *– Rozměry ekonomizéru*
***Obr. 15.1.2*** *– Tepelné schéma ekonomizéru*
***Obr. 15.2.1*** *– Rozměry ohříváku vzduchu*
***Obr. 15.2.2*** *– Tepelné schéma ohříváku vzduchu*

# 20 Seznam tabulek

***Tab. 2.1*** *– Složení čistého dřeva*
***Tab. 2.2*** *– Složení hnědého uhlí*
***Tab. 2.3*** *– Složení nového paliva*
***Tab. 3.2.1*** *– Střední hodnoty produktů spalování*
***Tab. 3.3.1*** *– Entalpie složek spalin a měrné teplo*
***Tab. 3.3.2*** *– Entalpie spalin a vzduchu*
***Tab. 6.1*** *– Tlakové ztráty*
***Tab. 6.9.1*** *– Výpočtové parametry páry/vody*
***Tab. 12.1.1*** *– Parametry trubek přehříváku 3*
***Tab. 12.1.2*** *– Parametry páry přehříváku 3*
***Tab. 12.1.3*** *– Parametry spalin přehříváku 3*
***Tab. 12.3.1*** *– Parametry závěsných trubek u P3*
***Tab. 12.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek u P3*
***Tab. 13.1.1*** *– Parametry trubek přehříváku 2*
***Tab. 13.1.2*** *– Parametry páry přehříváku 2*
***Tab. 13.1.3*** *– Parametry spalin přehříváku 2*
***Tab. 13.3.1*** *– Parametry závěsných trubek u P2*
***Tab. 13.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek u P2*
***Tab. 14.1.1*** *– Parametry trubek přehříváku 1*
***Tab. 14.1.2*** *– Parametry páry přehříváku 1*
***Tab. 14.1.3*** *– Parametry spalin přehříváku 1*
***Tab. 14.3.1*** *– Parametry závěsných trubek pro první část P1*
***Tab. 14.3.2*** *– Parametry páry závěsných trubek pro první část P1*
***Tab. 15.1.1*** *– Parametry trubek ekonomizéru*
***Tab. 15.1.2*** *– Parametry vody v ekonomizéru*
***Tab. 15.1.3*** *– Parametry spalin v ekonomizéru*
***Tab. 15.2.1*** *– Parametry trubek ohříváku vzduchu*
***Tab. 15.2.2*** *– Parametry vzduchu v OVZ*
***Tab. 15.2.3*** *– Parametry spalin v OVZ*

# 21 Seznam použitých zkratek a symbolů

| Symbol | Jednotka | Význam |
|---|---|---|
| a | [m] | šířka spalovací komory |
| $a_0$ | **[-]** | stupeň černosti ohniště |
| $a_{pl}$ | **[-]** | stupeň černosti plamene |
| $A^r$ | [%] | procento popelovin v původním stavu paliva |
| $a_{st}$ | **[-]** | stupeň černosti povrchu stěn |
| b | [m] | hloubka tahu |
| $B_0$ | [-] | Boltzmannovo číslo |
| $c_d$ | [-] | opravný koeficient na vnitřní průměr trubky |
| $c_f$ | **[-]** | opravný koeficient na frakci popelkových částeček |
| $c_i$ | [%] | podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků |
| $c_m$ | [m] | výška mříže |
| $c_s$ | [kJ/m$^3$K] | měrné teplo suchého vzduchu |
| $c_s$ | [%] | podíl popela ve škváře |
| $c_s$ | [-] | oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči na poměrné podélné rozteči |
| $c_{su}$ | [kJ/kgK] | měrné teplo sušiny paliva |
| $c_ú$ | [%] | podíl popela v úletu |
| $c_v$ | [kJ/m$^3$K] | měrné teplo vlhkého vzduchu |
| $c_w$ | [kJ/kgK] | měrné teplo vody |
| $c_z$ | [-] | oprava na počet podélných řad |
| d | [μm] | střední efektivní průměr částeček popílku |
| d | [g/kg] | obsah vody ve vzduchu |
| d | [m] | průměr trubek |
| $d_e$ | [m] | ekvivalentní průměr |
| $d_{in}$ | [m] | vnitřní průměr trubky |
| f | [-] | součinitel vlhkosti |
| $F_P$ | [m$^2$] | průřez pro páru |
| $F_{sp}$ | [m$^2$] | světlý průřez spalin |
| $F_{st}$ | [m$^2$] | povrch ohniště |
| $F_{ús}$ | [m$^2$] | účinná sálavá plocha stěn ohniště |
| $F_v$ | [m$^2$] | průtočný průřez pro vodu |
| H | [%] | procento hořlaviny v původním stanu paliva |
| c | [m] | výška spalovací komory |
| $C_{H20}$ | [kJ/m$^3$K] | měrné teplo vodní páry |
| i | [kJ/m$^3$] | entalpie jednotlivých složek spalin |
| i‘ | [kJ/kg] | entalpie syté páry |
| i‘‘ | [kJ/kg] | entalpie syté kapaliny |

| Symbol | Jednotka | Význam |
|---|---|---|
| $i_{nv}$ | [kJ/kg] | entalpie napájecí vody |
| $I_o$ | [kJ/kg] | entalpie spalin na konci ohniště |
| $i_p$ | [kJ/kg] | fyzické teplo paliva |
| $I_p$ | [kJ/kg] | entalpie popílku |
| $i_{pp}$ | [kJ/kg] | entalpie přehřáté páry |
| $I_{sp}$ | [kJ/kg] | entalpie spalin |
| $I_{SPmin}$ | [kJ/kg] | minimální množství spalin |
| $I_u$ | [kJ/kg] | teplo uvolněné při spalování |
| $I_{VZmin}$ | [kJ/kg] | entalpie minimálního množství vzduchu |
| k | [l/m·MPa] | součinitel zeslabení sálání |
| k | [W/m$^2$K] | součinitel prostupu tepla |
| $k_k$ | [l/m·MPa] | součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi |
| $k_p$ | [l/m·MPa] | součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi |
| $k_{sp}$ | [l/m·MPa] | součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů |
| M | [-] | součinitel respektující průběh teplot v ohništi |
| $M_p$ | [kg/s] | množství paliva přivedeného do kotle |
| $M_{pp}$ | [kg/s] | parní výkon kotle |
| $M_{pv}$ | [kg/s] | množství paliva skutečně spáleného |
| $M_v$ | [kg/s] | množství vstřiku |
| $n_{řad}$ | [-] | počet řad |
| $n_{tr}$ | [-] | počet trubek |
| $n_{tr}$ | [-] | počet trubek v jedné řadě |
| $n_{zav}$ | [-] | počet závěsných trubek |
| $O_{Ar}$ | [m$^3$/kg] | objem Ar ve spalinách |
| $O_{CO2}$ | [m$^3$/kg] | objem $CO_2$ ve spalinách |
| $O_{H20min}$ | [m$^3$/kg] | minimální objem vodní páry |
| $O_{N2}$ | [m$^3$/kg] | objem N2 ve spalinách |
| $O_{O2min}$ | [m$^3$/kg] | minimální množství kyslíku ke spálení **1** kg paliva |
| $O_{SO2}$ | [m$^3$/kg] | objem SO2 ve spalinách |
| $O_{SP}$ | [m$^3$/kg] | skutečné množství spalin |
| $O_{SPC}$ | [kJ/kgK] | střední celkové měrné teplo spalin |
| $O_{SPmin}$ | [m$^3$/kg] | minimální množství vlhkých spalin |
| $O^s_{SPmin}$ | [m$^3$/kg] | minimální množství suchých spalin |
| $O^{sv}_{SPmin}$ | [m$^3$/kg] | minimální množství vlhkých spalin při použití suchého vzduchu |
| $O_{vz}$ | [m$^3$/kg] | skutečné množství vzduchu |
| $O_{VZmin}$ | [m$^3$/kg] | minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva |
| p | [MPa] | tlak v ohništi |
| p" | [MPa] | absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu |

| Symbol | Jednotka | Význam |
|---|---|---|
| $p_c$ | [MPa] | celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu |
| $p_{nv}$ | [MPa] | tlak napájecí vody |
| Pr | **[-]** | Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu |
| $p_{sp}$ | [MPa] | parciální tlak tříatomových plynů |
| q | **[-]** | střední zatížení stěn ohniště |
| $Q_c$ | [kW] | celkové teplo dodané ohništi |
| $Q_i^r$ | [kJ/kg] | výhřevnost paliva |
| $Q_p^p$ | [kJ/kg] | teplo přivedené do kotle |
| $Q_s$ | [kJ/kg] | množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn |
| $Q^S_{VZmin}$ | [$m^3$/kg] | minimální množství suchého vzduchu ke spálení **1** kg surového paliva o výhřevnosti $Q_i^r$, |
| $Q_{vz}$ | [kJ/kg] | teplo přivedené do kotle se vzduchem |
| R | [$m^2$] | plocha hořící vrstvy paliva na roštu |
| $r_{CO2}$ | **[-]** | objemové části tříatomových plynů |
| $r_{H2O}$ | **[-]** | objemová část vodní páry ve spalinách |
| $r_{NO2}$ | **[-]** | objemové koncentrace tříatomových plynů |
| $r_{sp}$ | **[-]** | součet objemových částí tříatomových plynů |
| s | [m] | účinná tloušťka sálavé vrstvy |
| S | [$m^2$] | plocha výparných ploch |
| $s_1$ | [m] | příčná rozteč |
| $s_2$ | [m] | podélná rozteč |
| t | [m] | tloušťka stěn trubek |
| $T_a$ | [K] | teplota nechlazeného plamene |
| $T_o$ | [K] | absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště |
| $t_p$ | [°C] | teplota spalin |
| $t_{stř}$ | [°C] | střední teplota |
| $t_{syt}$ | [°C] | teplota sytosti |
| $t_{vz}$ | [°C] | teplota nasávaného vzduchu |
| $T_z$ | [K] | absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn |
| v | [$m^3$/kg] | měrný objem |
| $V_{H2O}$ | [%] | objem vodní páry na **1** $m^3$ suchého vzduchu |
| $V_o$ | [$m^3$] | aktivní objem ohniště |
| $V_{SP}$ | [$m^3$/kg] | průtok spalin |
| $w_p$ | [m/s] | rychlost páry |
| $w_{sp}$ | [m/s] | rychlost proudění spalin |
| $w_v$ | [m/s] | rychlost vody |
| x | [-] | úhlový součinitel |
| $X_i$ | [%] | podíl popela z celkového množství v palivu |
| $x_o$ | [-] | poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene |

| Symbol | Jednotka | Význam |
|---|---|---|
| $X_p$ | [%] | procento popela v úletu |
| $x_{st}$ | [-] | uhlový součinitel |
| $X_ú$ | [%] | podíl popela v úletu |
| $\alpha$ | **[-]** | přebytek vzduchu |
| $\alpha_c$ | [W/m$^2$K] | součinitel přestupu tepla ze spalin do stěny |
| $\alpha_2$ | [W/m$^2$K] | součinitel přestupu tepla stěny do media |
| $\alpha_k$ | [W/m$^2$K] | součinitel přestupu tepla konvekcí |
| $\alpha_s$ | [W/m$^2$K] | součinitel přestupu tepla sáláním |
| $\Delta i$ | [kJ/kg] | rozdíl entalpií média |
| $\Delta p$ | [MPa] | tlakové ztráty v jednotlivých částech kotle |
| $\Delta t$ | [°C] | střední logaritmická teplota |
| $\varepsilon$ | [-] | součinitel znečištění výhřevné plochy |
| $\varepsilon_o$ | [-] | výchozí součinitel zanesení |
| $\zeta$ | [%] | celkové ztráty |
| $\zeta_{cn}$ | [%] | ztráta chemickým nedopalem |
| $\zeta_{fi}$ | [%] | ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků |
| $\zeta_{fiú}$ | [%] | ztráta v úletu |
| $\zeta_k$ | [%] | ztráta komínová |
| $\zeta_{mn}$ | [%] | ztráta mechanickým nedopalem |
| $\zeta_{sv}$ | [%] | ztráta sdílením tepla do okolí |
| $\eta_k$ | [%] | tepelná účinnost kotle |
| $\vartheta_0$ | [°C] | koncová teplota |
| $\vartheta_a$ | [°C] | teoretická teplota |
| $\lambda$ | [W/mK] | součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu |
| $\mu$ | [g/m$^3$] | koncentrace popílku ve spalinách |
| $\nu$ | [m$^2$/s] | součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu |
| $\xi$ | [-] | součinitel využití |
| $\sigma_1$ | **[-]** | poměrná příčná rozteč |
| $\sigma_2$ | **[-]** | poměrná podélná rozteč |
| $\phi$ | [%] | relativní vlhkost vzduchu |
| $\phi$ | [-] | součinitel uchování tepla |
| $\chi_1$ | [-] | součinitel závislý na druhu paliva |
| $\chi_2$ | [-] | součinitel závislý na způsobu spalování |
| $\psi$ | **[-]** | součinitel tepelné efektivnosti |

# 22 Seznam příloh

Příloha 1: Schéma kotle