



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH ROŠTOVÉHO KOTLE S PŘIROZENOU CIRKULACÍ NA SPALOVÁNÍ SLÁMY Z PŠENICE, ŽITA A JEČMENE

STEAM BOILER WITH GRATE FIRING BURNING WHEAT STRAW

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. PETR KŘIVÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.**

BRNO 2014







## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce je návrh parního roštového kotle o výkonu 40 t/h pro spalování slámy. Požadované parametry vyrobené páry jsou teplota 420 °C a tlak 5,5 MPa. Zadané palivo je obilná sláma o výhřevnosti 9,5 MJ/kg. Výpočet je proveden od stechiometrického výpočtu z prvkového rozboru, až po výpočet jednotlivých rozměrů a výhřevných ploch kotle.

## **Klíčová slova**

Kotel na biomasu, sláma, biomasa, přehřívák, výparník, ekonomizér

## **Abstract**

The aim of the thesis is the design of the steam grate boilers of 40 t/h for straw burning. The required parameters are generated steam temperature 420 °C and a pressure of 5.5 MPa. The specified fuel is cereal straw with a calorific value of 9.5 MJ/kg. The calculation is made from the stoichiometric calculation of elemental analysis, to calculate the individual dimensions and heating surfaces of the boiler.

## **Keywords**

Biomass boiler, straw, biomass, superheater, evaporator, economizer

## **Bibliografická citace**

KŘIVÁK, P. *Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma „*Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene*“ vypracoval samostatně, s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu.

Jméno a příjmení:

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za odborné vedení této práce a Ing. Pavlu Křemínskému za mnoho cenných rad během konzultací.



## Obsah

1. Úvod .....	13
1.1. Energetické využití biomasy .....	13
1.2. Technické parametry a popis kotle .....	14
2. Stechiometrie .....	15
2.1. Množství vzduchu .....	15
2.2. Minimálních objemy jednotlivých složek ve spalinách .....	16
2.3. Minimální množství spalin .....	16
2.4. Skutečné objemy spalin a vzduchu .....	17
2.5. Entalpie vzduchu a spalin .....	18
3. Tepelná bilance kotle .....	21
3.1. Teplo přivedené do kotle .....	21
3.2. Tepelné ztráty a tepelná účinnost kotle .....	22
3.2.1. Ztráta mechanickým nedopalem $Z_c$ .....	22
3.2.2. Ztráta chemickým nedopalem $Z_{cn}$ .....	23
3.2.3. Ztráta sdílením tepla do okolí $Z_{sv}$ .....	23
3.2.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků $Z_f$ .....	23
3.2.5. Ztráta citelným teplem spalin $Z_k$ .....	24
3.2.6. Tepelná účinnost kotle .....	24
3.3. Výrobní teplo páry a množství paliva .....	25
3.3.1. Výrobní teplo páry .....	25
3.3.2. Množství paliva .....	25
4. Návrh konvekčních ploch .....	26
4.1. Přehřívák III .....	26
4.2. Přehřívák II .....	27
4.3. Přehřívák I .....	28
4.4. Závěsné trubky .....	29
4.5. Výparník .....	30
4.6. Ekonomizér .....	30
4.7. Celkový tepelný výkon .....	31
5. Výpočet spalovací komory .....	33
5.1. Návrh rozměrů spalovací komory .....	34
5.1.1. Výpočet plochy a objemu .....	35
5.2. Tepelný výpočet ohniště .....	38
5.2.1. Skutečná teplota na výstupu z ohniště .....	38
5.2.2. Užitečné teplo uvolněné ve spalinách .....	39

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

5.2.3.	Stupeň černosti ohniště .....	40
5.2.4.	Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn .....	42
6.	Mříž.....	43
6.1.	Tepelný výpočet mříže .....	43
6.1.1.	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin .....	44
6.1.2.	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	45
6.1.3.	Součinitel prostupu tepla.....	47
6.1.4.	Tepelný výkon mříže .....	47
6.2.	Přepočet teploty spalin na výstupu z mříže: .....	48
7.	Výpočet II. tahu kotle .....	49
7.1.	Základní parametry II. tahu .....	49
7.1.1.	Konstrukční rozměry II. tahu .....	49
7.1.2.	Ověření rychlosti spalin v nejužším místě .....	52
7.2.	Tepelný výpočet membránové stěny II. tahu.....	53
7.2.1.	Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin.....	53
7.2.2.	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	53
7.2.3.	Součinitel prostupu tepla.....	55
7.2.4.	Tepelný výkon v II. tahu .....	55
7.2.5.	Přepočet teploty spalin na výstupu z II. tahu .....	56
8.	Výpočet III. tahu kotle .....	57
8.1.	Výpočet délky III. tahu .....	57
8.2.	Výpočet I. části III. tahu (obratové komory) .....	58
8.2.1.	Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin.....	58
8.2.2.	Návrh rozměrů obrátové komory .....	59
8.2.3.	Výpočet membránové stěny.....	61
8.2.4.	Výpočet závěsných trubek .....	64
8.2.5.	Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu.....	69
8.3.	Výpočet II. části III. tahu (přehříváku III.).....	70
8.3.1.	Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin.....	70
	<i>Tab. 8.5: Rozměry třetího přehříváku.....</i>	<i>71</i>
8.3.2.	Výpočet membránové stěny.....	71
8.3.3.	Výpočet trubkového svazku přehříváku III .....	74
8.3.4.	Výpočet závěsných trubek .....	78
8.3.5.	Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části III. tahu.....	81
8.4.	Výpočet III. části III. tahu (přehřívák II.).....	83
8.4.1.	Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin.....	83
	<i>Tab. 8.8: Rozměry přehříváku II.....</i>	<i>83</i>

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

8.4.2.	Výpočet membránové stěny.....	84
8.4.3.	Výpočet přehříváku II.....	87
8.4.4.	Výpočet závěsných trubek.....	90
8.4.5.	Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části III. tahu.....	94
8.5.	Výpočet IV. části III. tahu.....	95
8.5.1.	Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin.....	95
8.5.2.	Výpočet membránové stěny.....	96
8.5.3.	Výpočet přehříváku I-b.....	99
8.5.4.	Výpočet závěsných trubek.....	102
8.5.5.	Přepočet teploty spalin na výstupu ze 4. části III. tahu.....	105
9.	Výpočet IV.....	107
9.1.	Návrh rozměru IV. a V. tahu.....	107
9.2.	Výpočet přehříváku I-a.....	107
9.2.1.	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	108
9.2.2.	Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry 109	
9.2.3.	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	110
9.2.4.	Součinitel prostupu tepla.....	111
9.2.5.	Tepelný výkon přehříváku I-a.....	112
9.2.6.	Skutečná teplota spalin na konci 1. části IV. tahu.....	113
9.3.	Výpočet ohříváku vzduchu OV2.....	113
9.3.1.	Bilance ohřívávaného vzduchu.....	114
9.3.2.	Parametry ohříváku vzduchu OV2.....	115
9.3.3.	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	116
9.3.4.	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	117
9.3.5.	Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu: 118	
9.3.6.	Součinitel prostupu tepla ohříváku vzduchu OV2.....	119
	Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:.....	119
9.3.7.	Tepelný výkon ohříváku vzduchu OV2.....	119
9.3.8.	Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části IV. tahu.....	120
9.4.	Výpočet Ekonomizéru.....	121
9.4.1.	Parametry Ekonomizéru.....	122
9.4.2.	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	123
9.4.3.	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	123
9.4.4.	Součinitel prostupu tepla.....	125
9.4.5.	Tepelný výkon Ekonomizéru.....	125

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

9.4.6. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části IV. tahu .....	126
10. Výpočet V. tahu .....	127
10.1. Výpočet ohříváku vzduchu OV1 .....	128
10.1.1. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin .....	128
10.1.2. Součinitel přestupu tepla sáláním .....	129
10.1.3. Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu	130
10.1.4. Součinitel prostupu tepla.....	131
10.1.5. Tepelný výkon ohříváku vzduchu OV1 .....	131
10.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z V. tahu.....	132
11. Kontrola tepelné bilance .....	134
12. Závěr .....	135
13. Seznam použitých zdrojů.....	136
14. Seznam zkratk a použitých symbolů.....	137
15. Seznam tabulek, obrázků a příloh.....	141
15.1. Seznam obrázků.....	141
15.2. Seznam tabulek .....	141
15.3. Seznam příloh .....	142

# 1. Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukčním uspořádáním kotle na biomasu a to konkrétně na slámu. Vzhledem k snižujícím se zásobám fosilních paliv v známých nalezištích a jejich zvyšujícím se cen a také zvyšujícím se nákladů na výrobu tepla, se čím dál častěji obrací zájem k spalování alternativních paliv. Významným alternativním palivem a zdrojem energeticky využitelné energie je biomasa, v níž je uložena sluneční energie. Pojem biomasa obvykle označuje substanci biologického původu, jako je rostlinná biomasa pěstovaná v půdě nebo ve vodě, živočišná biomasa, vedlejší organické produkty nebo organické odpady.

## 1.1. Energetické využití biomasy

Nejčastějším energetickým využitím biomasy v ČR je podle [4] její spalování, při spalování dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny, a při následné oxidaci se uvolňuje energie, oxid uhličitý a voda. Oproti spalování fosilních paliv má spalování biomasy v podstatě nulovou bilanci CO<sub>2</sub>, který patří mezi tzv. skleníkové plyny. Produkce CO<sub>2</sub> ze spalování biomasy je neutrální, protože množství tohoto plynu uvolněné do ovzduší spalováním je přibližně stejné jako to, které je zpětně vázáno do rostlin v zemědělských a lesních porostech.

Biomasa je velmi složité palivo, protože podíl těkavé hořlaviny je velmi vysoký (u dřeva je 70 %, u slámy 80 %) a vzniklé plyny mají různé spalovací teploty. Podmínkou dokonalého spalování je vysoká teplota, účinné směšování se vzduchem a prostor dostatečný k tomu, aby všechny plyny dobře shořely tam kde mají a nestávalo se, že budou hořet až v komíně [4].

### Rozdělení biomasy podle [2]

#### Podle typu rostliny:

- Stébelniny
- Dřeviny

#### Podle způsobu získávání:

- Záměrně pěstovaná biomasa  
(energetické rychlerostoucí dřeviny, bylinné rostliny)
- Odpadní biomasa
  - odpady ze zemědělské výroby
  - odpady ze živočišné výroby
  - odpady z lesní těžby
  - odpady z dřevozpracujícího průmyslu

Pro energetické použití se dřevo tzv. štěpkuje, piliny se lisují do pelet a briket. Sláma se používá jak obilná, tak z olejnin, např. z řepky, lisuje se či se z ní také vyrábějí brikety a granule. Do seznamu povolených „energetických rostlin“ patří celá řada jednoletých, dvouletých i vytrvalých druhů [4].

## 1.2. Technické parametry a popis kotle

Dle zadání se jedná o parní bubnový kotel s přirozenou cirkulací o výkonu 40 t/h páry o parametrech 5,5 MPa a 420 °C s teplotou napájecí vody 105 °C. Kotel je určen pro spalování biomasy ve formě slámy.

Kotel je koncipován jako pětitažový. Přičemž první tři tažy jsou chlazené, tedy tvořeny membránovými stěnami výparníku a zbylé dva jsou nechlazené plechové. První taž je tvořen spalovací komorou ve tvaru L pro zajištění plošného zatížení roštu kotle. Do spalovací komory je přiváděné palivo ze zásobníku pomocí šneku. Rošt je chlazený primárním vzduchem o teplotě 200 °C, sekundární vzduch přiváděn několika vstupy na bočních stranách kotle. Primární a sekundární vzduch je rozdělen v poměru 50:50 a teplotě 200 °C. Na konci spalovací komory je spalinová mříž, skrz kterou proudí spaliny do druhého tahu kotle. Druhý taž je zde navrhnout z důvodu dostatečného vychlazení spalin před vstupem na teplosměnné plochy přehříváků. Po druhém tahu následuje obrátová komora s výsypkou popílku. Popílek je odváděn z důvodu snížení nebezpečí abraze a zanášení teplosměnných ploch nalepováním. V třetím tahu jsou umístěny výměňkové plochy třetího, druhého a druhé části prvního přehříváku, které jsou zavěšeny na závěsných trubkách. Ty jsou chlazené sytou párou z bubnu. Ve čtvrtém tahu je v následujícím pořadí umístěny: první část prvního přehříváku, druhý ohřívák vzduchu a ekonomizér rozdělný na tři části. V pátém tahu je umístěn první ohřívák vzduchu.

Kotel je zkonstruován jako samonosný, to znamená, že kotel stojí na nosné konstrukci.

## 2. Stechiometrie

Stechiometrické výpočty vycházejí z prvkového rozboru paliva, který byl doplněn konzultantem diplomové práce Tab. 2.1. Pomocí výpočtu získáme objem vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva. Výpočet také určí množství spalin, které vznikají při spalování paliva. Jedná se o výpočty objemové a je použito stechiometrických spalovacích rovnic a bilance látkového množství. Výpočet vzduchu je proveden pro podmínky, předpokládají relativní vlhkost vzduchu 70 % a venkovní teplotou 20 °C. Množství chloru ve spalinách je minimální, proto je v dalších výpočtech zanedbáno.

**Palivo:** sláma z pšenice, ječmen a žito

**Výhřevnost:** 9500 kJ/kg

*Tab. 2.1: Prvkový rozbor paliva*

Prvky spalin	Hodnota	Jednotka
C <sup>r</sup>	26,83	%
N <sub>2</sub> <sup>r</sup>	0,94	%
S <sup>r</sup>	0,12	%
A <sup>r</sup>	6,5	%
H <sub>2</sub> <sup>r</sup>	3,51	%
O <sub>2</sub> <sup>r</sup>	27,1	%
W <sup>r</sup>	35	%
Cl <sup>r</sup> max.	0,03	%

W... vlhkost paliva

C, N, S, H, O... hořlavé prvky organických látek

### 2.1. Množství vzduchu

Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (2-1)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{26,83}{12,01} + \frac{3,51}{4,032} + \frac{0,12}{32,06} - \frac{27,1}{32} \right) = 0,5063 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ \min}^S = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} = \frac{0,506322}{0,21} = 2,4110 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2-2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

Pro běžné podmínky je možno volit  $f = 1,0168$ , jež odpovídá relativní vlhkosti 70 % a teplotě 20 °C.

$$O_{VZ\ min}^V = f \cdot O_{VZ\ min}^S = 1,0168 \cdot 2,411057 = 2,4515\ Nm^3/kg \quad (2-3)$$

$f$  – vyjadřuje podíl vodní páry připadající na 1 Nm<sup>3</sup> suchého vzduchu

Minimální objem vodní páry ve spalovacím vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{H_2O\ min} = O_{VZ\ min}^V - O_{VZ\ min}^S = 2,451563 - 2,411057 = 0,0405\ Nm^3/kg \quad (2-4)$$

**2.2. Minimálních objemy jednotlivých složek ve spalinách**Oxid uhličitý

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ\ min}^S = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{26,83}{12,01} + 0,0003 \cdot 2,411057 \quad (2-5)$$

$$O_{CO_2} = 0,4980\ Nm^3/kg$$

Oxid siřičitý

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,12}{32,06} = 8,1934 \cdot 10^{-4}\ Nm^3/kg \quad (2-6)$$

Dusík

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ\ min}^S = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,94}{28,016} + 0,7805 \cdot 2,411057 \quad (2-7)$$

$$O_{N_2} = 1,8893\ Nm^3/kg$$

Argon

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ\ min}^S = 0,0092 \cdot 2,411057 = 0,0222\ Nm^3/kg \quad (2-8)$$

**2.3. Minimální množství spalin**Minimální množství suchých spalin:

Minimální množství suchých spalin vznikne dokonalým spálením paliva při minimálním přebytku vzduchu  $\alpha = 1$ .

$$O_{SP\ min}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 0,498005 + 8,1934 \cdot 10^{-4} + 1,889346 + \quad (2-9)$$

$$+ 0,022182 = 2,410352\ Nm^3/kg$$



Minimální objem vodní páry ve spalinách

$$O_{SP}^{H_2O \min} = \frac{44,8}{4,032 \cdot 100} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016 \cdot 100} \cdot W^r + O_{H_2O \min} \quad (2-10)$$

$$O_{SP}^{H_2O \min} = \frac{44,8}{4,032 \cdot 100} \cdot 3,51 + \frac{22,4}{18,016 \cdot 100} \cdot 35 + 0,0405 = 0,0865 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Minimální množství vlhkých spalin:

$$O_{SP_{min}}^V = O_{SP_{min}}^S + O_{SP}^{H_2O \min} = 2,410352 + 0,865674 = 3,276026 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2-11)$$

**2.4. Skutečné objemy spalin a vzduchu**

V reálných podmínkách k dokonalému promísení a spálení při stechiometrickém množství vzduchu nedochází. Proto je třeba volit součinitele přebytku vzduchu. Součinitel přebytku vzduchu volím  $\alpha = 1,4$  dle rady konzultanta diplomové práce. Součinitel je zvolen s ohledem na vlhkost paliva.

Skutečné množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ \text{ skut}}^S = \alpha \cdot O_{VZ \min}^S = 1,4 \cdot 2,411057 = 3,3754 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2-12)$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ \text{ skut}}^V = f \cdot O_{VZ \text{ skut}}^S = 1,0168 \cdot 3,375479 = 3,43218 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2-13)$$

Skutečné množství suchých spalin:

$$O_{SP_{skut}}^S = O_{SP \min}^S + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^S = 2,410352 + (1,4 - 1) \cdot 2,411057 \quad (2-14)$$

$$O_{SP_{skut}}^S = 3,374775 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$O_{SP_{skut}}^V = O_{SP_{min}}^V + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^V = 3,276026 + (1,4 - 1) \cdot 2,451563 \quad (2-15)$$

$$O_{SP_{skut}}^V = 4,256652 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

## 2.5. Entalpie vzduchu a spalin

Skutečná entalpie se vypočetla ze součtu entalpie spalin při spalování bez přebytku vzduchu a entalpie vzduchu, pro zvolený přebytek vzduchu. Výsledné hodnoty jsou zaneseny do Tab. 2.3 a to pro různá množství přebytku vzduchu.

**Tab. 2.2:** Měrné entalpie vybraných složek spalin [1]

Teplota °C	O <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	N <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> O [kJ/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	Ar [kJ/m <sup>3</sup> ]	popílek [kJ/m <sup>3</sup> ]
0							
100	132	170	130	150	189	93	80,8
200	267	357	260	304	392	186	169
300	407	559	392	463	610	278	264
400	551	772	527	626	836	372	360
500	690	994	666	795	1070	465	458
600	850	1225	804	969	1310	557	560
700	1004	1462	948	1149	1550	650	662
800	1160	1705	1094	1334	1800	743	767
900	1318	1952	1242	1526	2050	834	874
1000	1477	2204	1392	1723	2305	928	984
1500	2294	3504	2166	2779	3590	1390	1758
2000	3138	4844	2965	3926	4890	1855	2512

Entalpie minimálního objemu suchých spalin:

Entalpie produktů spalování jsou stanoveny dle [1], a jsou vypsány v Tab. 2.2. Příklad výpočtu entalpie spalin pro 1000°C je následující:

$$\begin{aligned}
 I_{SP\ min}^S &= O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} + O_{SP}^{H_2O\ min} \cdot i_{H_2O} = & (2-16) \\
 &= 0,498005 \cdot 2204 + 8,656745 \cdot 10^{-4} \cdot 2305 + 1,889345 \cdot 1392 + 0,022182 \cdot 928 + \\
 &+ 0,865674 \cdot 1723 = 5241,603\ kJ/kg
 \end{aligned}$$

Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu:

Příklad výpočtu pro 1000°C.

$$\begin{aligned}
 I_{VZ\ min}^V &= O_{VZ\ min}^V \cdot c_{VZ}^V \cdot t = 2,451563 \cdot 1,438799 \cdot 1000 & (2-17) \\
 I_{VZ\ min}^V &= 3527,305\ kJ/kg
 \end{aligned}$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Měrné teplo vlhkého vzduchu:

Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu je stanovena z měrné tepelné kapacity suchého vzduchu a obsahu vody ve vzduchu. Hodnoty jsou stanoveny dle [1].

$$c_{VZ}^V = c_{VZ}^S + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} \quad (2-18)$$

Obsah vody v 1 kg vlhkého vzduchu:

$$d = (f - 1) \cdot \frac{\rho_{H_2O} \cdot 10^3}{\rho_{VZ}} = (0,0168 - 1) \cdot \frac{0,804 \cdot 10^3}{1,293} = 10,446403 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-19)$$

Entalpie popílku:

Entalpie popílku ve spalinách se uvažuje, platí-li následující nerovnost [1].

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} = 90,909 \quad (2-20)$$

$6,5 > 90,909 \rightarrow$  nerovnost není splněna, tudíž  $I_p$  neuvažují

Kde:  $Q_i^r$  ... výhřevnost paliva [Kj/kg]  
 $X_p$  ... podíl popílku v úletu v celkové hmotnosti tuhých zbytků (zvoleno 15 %)

Entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu  $\alpha$ :

Příklad výpočtu pro teplotu 1000 °C a  $\alpha = 1,4$ .

$$I_{SP}^\alpha = I_{SP}^S + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ}^V = 5241,603 + (1,4 - 1) \cdot 3527,305 \quad (2-21)$$

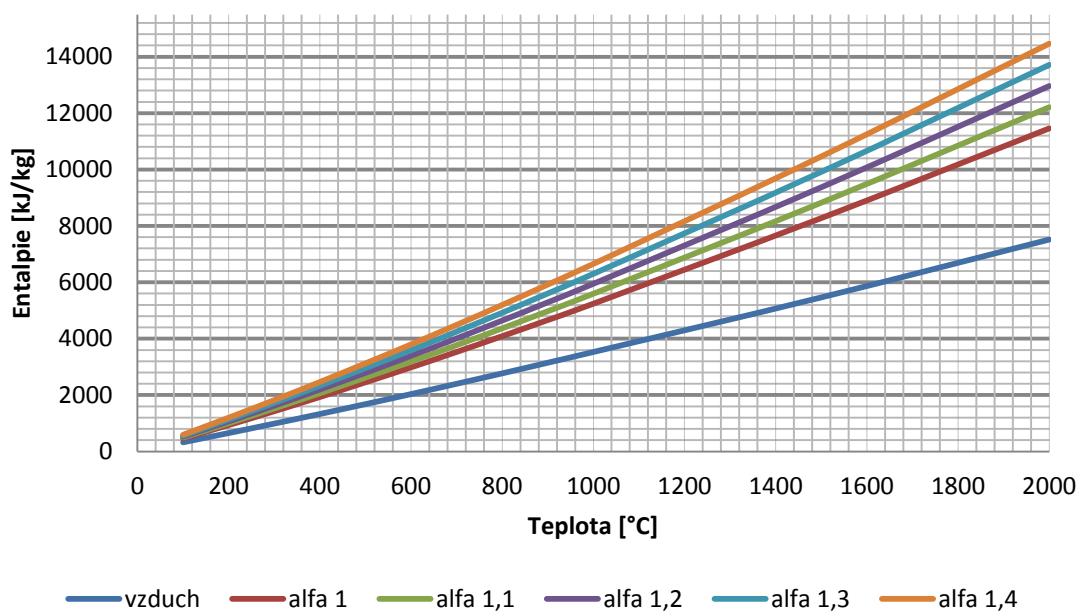
$$I_{SP}^\alpha = 6652,525 \text{ kJ/kg}$$

Vypočtené hodnoty entalpií jsou uvedeny v následující tabulce 2.3, podle nich byl zkonstruován I-t diagram vzduchu a spalin Obr. 2.1. Z těchto hodnot se bude v dalších výpočtech stanovovat teplota spalin v jednotlivých částech spalinového kanálu.

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Tab. 2.3.: Vypočtené hodnoty entalpie

Teplota [°C]	$c_{vVz}$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	$l_{vz,min}$ [kJ/kg]	$l_{sp,min}$ [kJ/kg]	$l_{sp,min}$ [kJ/kg]			
				$\alpha=1,1$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,3$	$\alpha=1,4$
100	1,325155	324,870036	462,34478	494,8318	527,3188	559,8058	592,2928
200	1,332439	653,311579	936,629821	1001,961	1067,292	1132,623	1197,954
300	1,342773	987,567913	1426,48212	1525,239	1623,996	1722,752	1821,509
400	1,355158	1328,9017	1930,99412	2063,884	2196,774	2329,665	2462,555
500	1,369576	1678,80026	2452,72398	2620,604	2788,484	2956,364	3124,244
600	1,382994	2034,29714	2981,35765	3184,787	3388,217	3591,647	3795,077
700	1,398428	2399,83384	3529,53165	3769,515	4009,498	4249,482	4489,465
800	1,412214	2769,70419	4088,80894	4365,779	4642,75	4919,72	5196,691
900	1,426347	3147,10193	4659,87231	4974,582	5289,293	5604,003	5918,713
1000	1,438799	3527,30503	5241,6034	5594,334	5947,064	6299,795	6652,525
1500	1,485971	5464,42835	8276,81702	8823,26	9369,703	9916,146	10462,59
2000	1,53281	7515,55983	11458,0397	12209,6	12961,15	13712,71	14464,26



Obr. 2.1.: I-t diagram vzduchu a spalin

### 3. Tepelná bilance kotle

Tepelná bilance slouží k stanovení množství paliva a potřebného tepla k ohřátí páry na stanovené parametry.

#### 3.1. Teplo přivedené do kotle

##### Teplo přivedené do kotle na 1 kg paliva

$$Q_p^P = Q_i^r + i_p = 9500 + 26,072 = 9526,072 \text{ kJ/kg} \quad (3-1)$$

Kde:  $Q_i^r$  ... výhřevnost paliva [Kj/kg]  
 $i_p$  ... fyzické teplo paliva [Kj/kg]

Fyzické teplo paliva se uvažuje jen v případě, je-li palivo přehříváno mimo kotel, nebo v případě, že splňuje následující podmínku danou nernovicí:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (3-2)$$

$$35 \geq \frac{9500}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$35 \geq 15,115 \rightarrow$  nerovnice je splněna, fyzické teplo tedy uvažujeme

Kde:  $Q_i^r$  ... výhřevnost paliva [Kj/kg]

Fyzické teplo paliva:

$$i_p = c_p \cdot t_p = 1,3036 \cdot 20 = 26,072 \text{ KJ/kg} \quad (3-3)$$

Kde:  $c_p$  ... měrné teplo paliva [Kj/kgK]  
 $t_p$  ... teplota paliva, zvoleno 20°C

Měrné teplo paliva:

$$c_p = c_w \cdot \frac{W^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W^r}{100} = 1,496 \cdot \frac{35}{100} + 1,2 \cdot \frac{100 - 35}{100} \quad (3-4)$$

$$c_p = 1,3036 \text{ KJ/kgK}$$

Kde:  $c_{su}$  ... měrné teplo sušiny paliva, volelo  $1,2 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$  dle rady konzultanta  
 $c_w$  ... měrné teplo vody [KJ/kgK]

### 3.2. Tepelné ztráty a tepelná účinnost kotle

Tepelná ztráty určují výslednou účinnost kotle. Jednotlivé tepelné ztráty jsou řešeny níže v této kapitole.

**Tab. 3.1.** Bilance popílku v jednotlivých částech kotle

	$C_i$	$X_i$	$t_i$	$c_i$
	%	%	°C	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
rošt	3	50	350	0,8895
2/3	25	20	500	0,917
4/5	20	15	350	0,8895
úlet	15	15	130	0,8194

Kde:  $C_i$  ... obsah spalitelných látek v pevných zbytcích [%]  
 $X_i$  ... bilance popele v jednotlivých částech kotle [%]  
 $t_i$  ... teploty popílku [°C]  
 $c_i$  ... měrné teplo popílku pro teploty  $t_i$  [kJ/kgK]

#### 3.2.1. Ztráta mechanickým nedopalem $Z_c$

Je způsobena zbytky nespálené hořlaviny v tuhých zbytcích odcházející z kotle ve formě popílku. Jednotlivé podíly hořlaviny a popílku jsou uvedeny v Tab. 3.1.

$$Z_c = Z_{cr} + Z_{c23} + Z_{c45} + Z_{cú} = 0,343 + 1,483 + 0,834 + 0,589 = 3,250 \text{ [%]} \quad (3-5)$$

Kde:  $Z_{cr}$  ... ztráta mech. nedopalem na roštu [%]  
 $Z_{c23}$  ... ztráta mech. nedopalem ve II. a III. tahu [%]  
 $Z_{c45}$  ... ztráta mech. nedopalem ve IV. a V. tahu [%]  
 $Z_{cú}$  ... ztráta mech. nedopalem úletu [%]

Ztráta na roštu:

$$Z_{cr} = \frac{C_r}{100 - C_r} \cdot \frac{X_r}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{3}{100 - 3} \cdot \frac{50}{100} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 32600 = 0,343983 \text{ [%]} \quad (3-6)$$

Kde:  $Q_{ci}$  ... průměrná výhřevnost spalitelných látek ve zbytcích, dle [1] činí  $32600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $A_r$  ... obsah popele v palivu [%]

Ztráta ve II. a III. tahu:

$$Z_{c23} = \frac{C_{23}}{100 - C_{23}} \cdot \frac{X_{23}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{20}{100} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 32600 \quad (3-7)$$

$$Z_{c23} = 1,4829 \text{ [%]}$$

Ztráta ve IV. a V. tahu:

$$Z_{c45} = \frac{C_{45}}{100 - C_{45}} \cdot \frac{X_{45}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{20}{100 - 20} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 32600 \quad (3-8)$$

$$Z_{c45} = 0,834158 \%$$

Ztráta v úletu:

$$Z_{cú} = \frac{C_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{X_{ú}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{15}{100 - 15} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 32600 \quad (3-9)$$

$$Z_{cú} = 0,588817 \%$$

### 3.2.2. Ztráta chemickým nedopalem $Z_{cn}$

Je dána chemickou nedokonalostí spalování a vyjadřuje teplo ztracené v důsledku nespálení hořlavých plynů ve spalínách (CO), které odchází komínem. Po odborné konzultaci a pro současné limity volím  $Z_{cn} = 0,08 \%$

### 3.2.3. Ztráta sdílením tepla do okolí $Z_{sv}$

Je dána množstvím tepla, unikající pláštěm kotle do okolí. Hodnota se odvíjí od způsobu oplechování, velikosti povrchu a kvality izolace stěn. Ztráta byla stanovena dle podkladů od vedoucího práce, pomocí empirického vzorce závislého na velikosti kotle. Teplo uvolněné v kotli bylo stanoveno dle předchozích výpočtů na  $Q_n = 31 \text{ MW}$ .

$$Z_{so} = \frac{Q_{so}}{Q_N} = \frac{55276,99}{31028631} = 0,001781 \% \quad (3-10)$$

Teplo ztracené sáláním do okolí:

$$Q_{so} = 0,315 \cdot Q_{so}^{0,7} = 0,315 \cdot 31028631^{0,7} = 55276,99 \text{ W} \quad (3-11)$$

### 3.2.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků $Z_f$

Vyjadřuje nevyužitě teplo odcházejících tuhých zbytků. Je způsobena ohřátím tuhých zbytků odcházejících z kotle. Hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 3.1.

$$Z_f = Z_{fr} + Z_{f23} + Z_{f45} + Z_{fú} = 0,109 + 0,083 + 0,039 + 0,013 = 0,245 \text{ [%]} \quad (3-12)$$

Kde:  $Z_{fr}$  ... ztráta fyz. teplem tuhých zbytků na roštu [%]  
 $Z_{f23}$  ... ztráta fyz. teplem tuhých zbytků ve II. a III. tahu [%]  
 $Z_{f45}$  ... ztráta fyz. teplem tuhých zbytků ve IV. a V. tahu [%]  
 $Z_{fú}$  ... ztráta fyz. teplem tuhých zbytků úletu [%]

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Ztráta na roštu:

$$Z_{f_r} = \frac{X_r}{100 - C_r} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_r \cdot t_r = \frac{50}{100 - 3} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 0,8895 \cdot 350 \quad (3-13)$$

$$Z_{f_r} = 0,109499 \%$$

Ztráta ve II. a III. tahu:

$$Z_{f_{23}} = \frac{X_{23}}{100 - C_{23}} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_{23} \cdot t_{23} = \frac{20}{100 - 25} \cdot 9526,072 \cdot 0,917 \cdot 500 \quad (3-14)$$

$$Z_{f_{23}} = 0,083427 \%$$

Ztráta ve IV. a V. tahu:

$$Z_{f_{45}} = \frac{X_{45}}{100 - C_{45}} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_{45} \cdot t_{45} = \frac{15}{100 - 20} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 0,8895 \cdot 350 \quad (3-15)$$

$$Z_{f_{45}} = 0,03983 \%$$

Ztráta v úletu:

$$Z_{f_{\acute{u}}} = \frac{X_{\acute{u}}}{100 - C_{\acute{u}}} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_{\acute{u}} \cdot t_{\acute{u}} = \frac{15}{100 - 15} \cdot \frac{6,5}{9526,072} \cdot 0,8194 \cdot 130 \quad (3-16)$$

$$Z_{f_{\acute{u}}} = 0,012827 \%$$

**3.2.5. Ztráta citelným teplem spalin  $Z_k$** 

Je způsobena spalinami odcházejícími komínem z kotle, jedná se o nejvýznamnější ztrátu, jež ovlivňuje účinnost kotle. Teplotu spalin na konci kotle volím 130°C, aby nedošlo k podkročení rosného bodu a kondenzaci. Tím se zamezí vzniku nízkoteplotní koroze.

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp}^{130} - I_{vz}}{Q_p^p} = (100 - 3,250) \cdot \frac{773,9913 - 113,233}{9526,072} \quad (3-17)$$

$$Z_k = 6,710885 \%$$

Kde:  $I_{sp}^{130}$  ... entalpie spalin při teplotě 130°C a přebytku vzduchu 1,4 [kJ/kg]  
 $I_{vz}$  ... entalpie vzduchu při okolní teplotě 20°C a přebytku vzduchu 1,4 [kJ/kg]

$$I_{vz} = \alpha \cdot I_{vz\_min}^{20} = 1,4 \cdot 80,8 = 113,233 \text{ kJ/kg} \quad (3-18)$$

**3.2.6. Tepelná účinnost kotle**

Je použita nepřímá metoda určení účinnosti. Pro tuto metodu je jednodušší získat podklady.

$$\eta_k = 100 - (Z_c + Z_{cn} + Z_f + Z_{sv} + Z_k) \quad (3-19)$$

$$\eta_k = 100 - (3,250 + 0,08 + 0,245 + 0,0017 + 6,711) = 89,7118\%$$



### 3.3. Výrobní teplo páry a množství paliva

Teplo potřebné k ohřátí páry na stanovenou hodnotu. Stanovíme z něj potřebné množství přiváděného paliva.

#### 3.3.1. Výrobní teplo páry

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 11,111 \cdot (3237,106 - 444,529) = 31028,63 \text{ kJ/s} \quad (3-20)$$

Kde:  $M_{pp}$  ... parní výkon kotle  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$   
 $i_{pp}$  ... entalpie přehřáté páry (420°C; 5,5MPa) [kJ/kg]  
 $i_{nv}$  ... entalpie napájecí vody (105°C) [kJ/kg]

Entalpie přehřáté páry a entalpie napájecí vody byli stanoveny pomocí parních tabulek [3], jako funkce tlaku a teploty. Teplota vody a přehřáté páry jsou zadány stejně jako teplota napájecí vody. Tlak napájecí vody se vypočte z tlakových ztrát, ty jsou uvedeny v tabulce 4.1.

#### 3.3.2. Množství paliva

Množství paliva přivedeného do kotle:

$$M_p = \frac{Q_V}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{31028,63}{9526,072 \cdot \frac{89,712}{100}} = 3,630772 \text{ kg/s} \quad (3-21)$$

Skutečné množství spáleného paliva:

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) = 3,631 \cdot \left(1 - \frac{3,2499}{100}\right) = 3,512775 \text{ kg/s} \quad (3-22)$$

## 4. Návrh konvekčních ploch

Účelem této kapitoly je návrh přerozdělení celkového tepelného výkonu na jednotlivé konvekční plochy kotle. Výpočet teplosměnných ploch je dán požadavky na páru, pro kterou je kotel navrhován. Metodika výpočtu podle [1]. Pro výpočet bylo využito program X-Stema [3]. Výsledné hodnoty jsou zaneseny v Tab. 4.2 a zakresleny v pilovém diagramu Obr. 4.3.

Uvažované tlakové ztráty v jednotlivých teplosměnných plochách:

**Tab. 4.1:** Tlakové ztráty částí kotle

Teplosměnná plocha	Tlaková ztráta [MPa]
přehřívák III.	0,1
přehřívák II.	0,1
přehřívák I.	0,1
výparník	0
ekonomizér	0,15

Tlak a teplota napájecí vody:

Tlak napájecí vody je dán součtem tlakových ztrát v jednotlivých částech kotle viz Tab. 4.1.

$$p_{nv} = p_{pp} + \Delta p_{přIII} + \Delta p_{přII} + \Delta p_{přI} + \Delta p_{vyp} \quad (4-1)$$

$$p_{nv} = 5,5 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0 + 0,15 = 5,95 \text{ MPa}$$

$t_{nv}$  – teplota napájecí vody,  $t_{nv} = 105 \text{ °C}$

$p_{nv}$  – tlak napájecí vody [MPa]

### 4.1. Přehřívák III

Z teploty a tlaku daných zadáním se stanoví výstupní entalpie páry. Následně se zvolí předpokládaný entalpický spád v přehříváku III. a z něho a tlakové ztráty se vypočtou vstupní parametry páry.

Volím entalpický spád:  $\Delta i_{přIII} = 180 \text{ kJ/kg}$

Výstupní parametry páry z přehříváku III:

$$p_{přIII}^{out} = 5,5 \text{ MPa}$$

$$t_{přIII}^{out} = 420 \text{ °C}$$

$$i_{přIII}^{out} = 3237,106 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry páry do přehříváku III:

$$p_{přIII}^{in} = p_{přIII}^{out} + \Delta p = 5,5 + 0,1 = 5,6 \text{ MPa} \quad (4-2)$$

$$i_{přIII}^{in} = i_{přIII}^{out} - \Delta i = 3237,106 - 180 = 3057,106 \text{ kJ/kg} \quad (4-3)$$

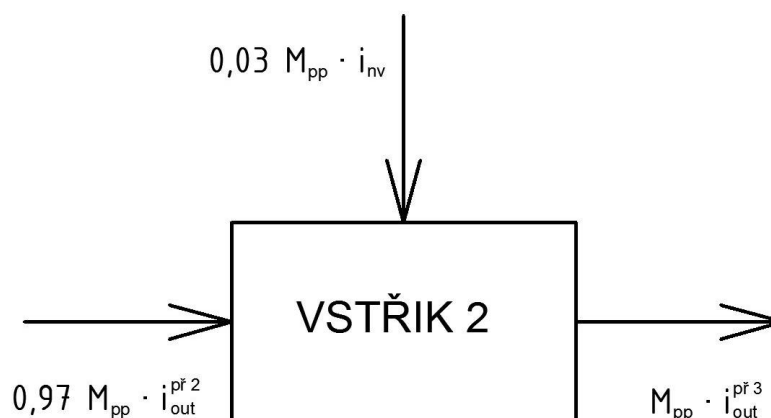
$$= 351,048 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tepelný výkon:

$$Q_{přIII} = M_{pp} \cdot (i_{přIII}^{out} - i_{přIII}^{in}) = 11,111 \cdot (3237,106 - 3057,106) = 2000 \text{ kW} \quad (4-4)$$

## 4.2. Přehřívák II

Mezi přehříváky II. a III. bude provedeno vstřikování páry a to z důvodu regulace teploty přehřáté páry. Množství vstřikované vody volím po odborné konzultaci 3 %.



**Obr. 4.1:** Bilanční schéma druhého vstřiku napájecí vody

Výstupní parametry páry z přehříváku II:

$$i_{přII}^{out} \cdot 0,97M_{pp} + i_{nv} \cdot 0,03M_{pp} = i_{přIII}^{in} \cdot M_{pp} \rightarrow i_{přII}^{out} = \frac{i_{přIII}^{in} \cdot M_{pp} - i_{nv} \cdot 0,03M_{pp}}{0,97 \cdot M_{pp}} \quad (4-5)$$

$$i_{přII}^{out} = \frac{3057,106 \cdot 11,111 - 443,232 \cdot 0,03 \cdot 11,111}{0,97 \cdot 11,111} = 3137,907 \text{ kJ/kg}$$

$$p_{přII}^{out} = p_{přIII}^{in} = 5,6 \text{ MPa}$$

$$t_{přII}^{out} = 381,319^\circ\text{C}$$

Vstupní parametry páry do přehříváku II:

$$p_{přII}^{in} = p_{přII}^{out} + \Delta p = 5,6 + 0,1 = 5,7 \text{ MPa} \quad (4-6)$$

Volím entalpický spád:  $\Delta i_{přII} = 210 \text{ kJ/kg}$

$$i_{přII}^{in} = i_{přII}^{out} - \Delta i_{přII} = 3137,907 - 210 = 2927,907 \text{ kJ/kg} \quad (4-7)$$

$$t_{přII}^{in} = 308,828 \text{ }^\circ\text{C}$$

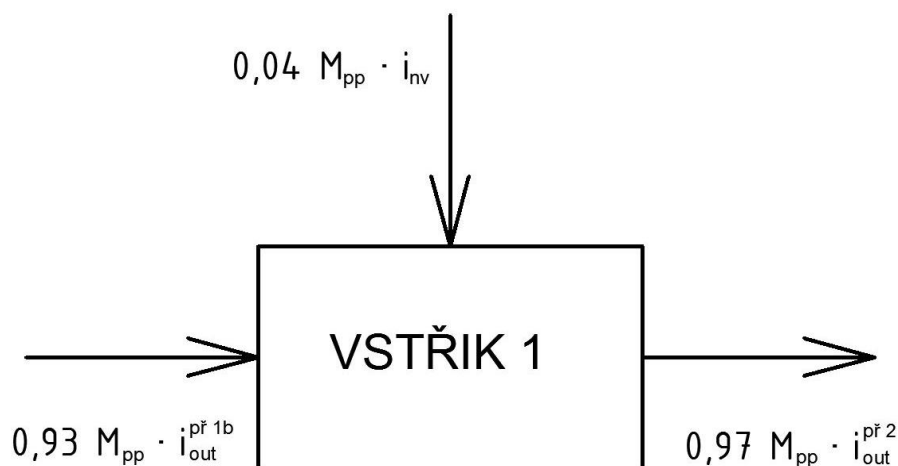
Tepelný výkon:

$$Q_{přII} = 0,97 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{přII} - i_{in}^{přII}) \quad (4-8)$$

$$Q_{přII} = 0,97 \cdot 11,111 \cdot (3137,907 - 2927,907) = 2263,333 \text{ kW}$$

### 4.3. Přehřívák I

Mezi přehříváky II. a I. bude taktéž provedeno vstřikování páry a to z důvodu regulace teploty přehřáté páry. Množství vstřikované vody volím po odborné konzultaci 3 %.



**Obr. 4.2:** Bilanční schéma prvního vstřiku napájecí vody

Výstupní parametry páry z přehříváku I:

$$i_{přI}^{out} \cdot 0,93M_{pp} + i_{nv} \cdot 0,04M_{pp} = i_{přII}^{in} \cdot 0,97M_{pp} \rightarrow i_{přI}^{out} = \frac{i_{přII}^{in} \cdot 0,97M_{pp} - i_{nv} \cdot 0,04M_{pp}}{0,93 \cdot M_{pp}}$$

$$i_{out}^{přI} = \frac{2927,907 \cdot 11,111 - 443,232 \cdot 0,04 \cdot 11,111}{0,93 \cdot 11,111} = 3034,719 \text{ kJ/kg} \quad (4-9)$$

$$p_{přl}^{out} = p_{přl}^{in} = 5,7 \text{ MPa}$$

$$t_{přl}^{out} = 343,987 \text{ °C}$$

Vstupní parametry páry do přehříváku I:

$$p_{přl}^{in} = p_{přl}^{out} + \Delta p = 5,7 + 0,1 = 5,8 \text{ MPa} \quad (4-10)$$

$$i_{přl}^{in} = i_{zt}^{out} = 2811,696 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{přl}^{in} = 278,8624 \text{ °C}$$

Tepelný výkon:

$$Q_{přl} = 0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{přl} - i_{in}^{přl}) \quad (4-11)$$

$$Q_{přl} = 0,93 \cdot 11,111 \cdot (3034,719 - 2811,696) = 2304,57 \text{ kW}$$

#### 4.4. Závěsné trubky

Závěsné trubky jsou chlazené sytou párou z bubny, která poté vstupuje do první části přehříváku I.

Výstupní parametry páry ze závěsných trubek:

$$t_{zt}^{out} = t_{přl}^{in} = 278,862 \text{ °C}$$

$$p_{zt}^{out} = p_{přl}^{in} = 5,8 \text{ MPa}$$

Volím entalpický spád:  $\Delta i_{zt} = 25 \text{ kJ/kg}$

$$i_{zt}^{out} = i_{zt}^{in} + \Delta i_{zt} = 2786,696 + 25 = 2811,696 \text{ kJ/kg} \quad (4-12)$$

Vstupní parametry páry do závěsných trubek:

$$p_{zt}^{in} = p_{zt}^{out} = 5,8 \text{ MPa}$$

$$i_{zt}^{in} = 2786,696 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{zt}^{in} = t_{vyp}^{out} = 273,388 \text{ °C}$$

Tepelný výkon:

$$Q_{zt} = 0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{zt}^{out} - i_{zt}^{in}) = 0,93 \cdot 11,111 \cdot (2811,696 - 2786,696) \quad (4-13)$$

$$Q_{zt} = 258,333 \text{ kW}$$

## 4.5. Výparník

Ve výparníku se mění sytá kapalina na sytou páru za stálé teploty a tlaku, jedná se o izobaricko-izotermický děj. Do výparníku vstupuje voda předehřátá z ekonomizéru a na výstupu je sytá pára převáděna do bubnu. Hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 4.2 a v pilovém diagramu Obr.4.3.

Výstupní parametry páry z výparníku:

$$t_{vyp}^{out} = t_{zt}^{in} = 273,388 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{vyp}^{out} = p_{zt}^{in} = 5,8 \text{ MPa}$$

$$i_{vyp}^{out} = i_{zt}^{in} = 2786,696 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry vody do výparníku:

$$t_{vyp}^{in} = t_{out}^{vyp} = 273,388 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{vyp}^{in} = p_{vyp}^{out} = 5,8 \text{ MPa}$$

$$i_{vyp}^{in} = 1202,385 \text{ kJ/kg}$$

Kde:  $i_{vyp}^{in}$  ... entalpie syté kapaliny je stanovená jako funkce tlaku [3].

Tepelný výkon:

$$Q_{vyp} = 0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{vyp} - i_{in}^{vyp}) \quad (3-14)$$

$$Q_{vyp} = 0,93 \cdot 11,111 \cdot (2786,696 - 1202,385) = 16371,22 \text{ kW}$$

## 4.6. Ekonomizér

Výstupní parametry vody z ekonomizéru:

Předpokládaný nedohřev vody v ekonomizéru je 110 °C, ekonomizér je napájen vodou o teplotě 105 °C.

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

$$t_{eko}^{out} = t_{in}^{vyp} - \Delta t = 273,388 - 110 = 163,388 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-15)$$

$$p_{eko}^{out} = p_{vyp}^{in} = 5,8 \text{ MPa}$$

$$i_{eko}^{out} = 693,183 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry vody do ekonomizéru:

$$t_{eko}^{in} = 105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{eko}^{in} = p_{out}^{eko} + \Delta p = 5,8 + 0,15 = 5,95 \text{ MPa} \quad (3-16)$$

$$i_{eko}^{in} = 444,5295 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný výkon:

$$Q_{eko} = 0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{eko} - i_{in}^{eko}) \quad (3-17)$$

$$Q_{eko} = 0,93 \cdot 11,111 \cdot (693,1829 - 444,529) = 2569,419 \text{ kW}$$

#### 4.7. Celkový tepelný výkon

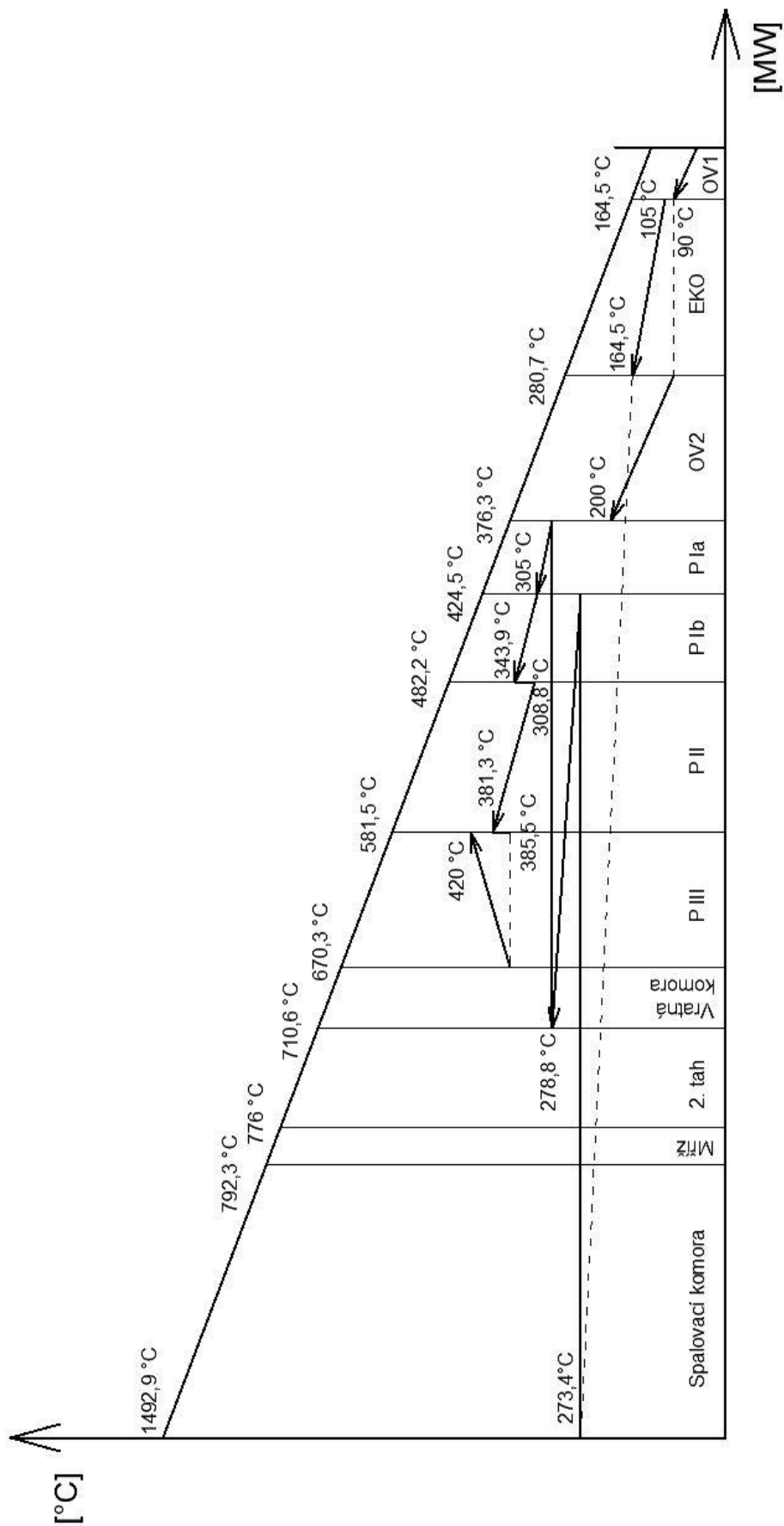
$$Q_{celk} = Q_{přIII} + Q_{přII} + Q_{přI} + Q_{zt} + Q_{vyp} + Q_{eko} \quad (3-18)$$

$$Q_{celk} = 2000 + 2263,33 + 2304,57 + 258,333 + 16,371,22 + 2569,419$$

$$Q_{celk} = 25766,87 \text{ kW}$$

**Tab. 4.2:** Základní parametry jednotlivých konvekčních ploch

Teplosměnná plocha		Teplota t [°C]	Tlak p [MPa]	Entalpie i [kJ/kg]	Entalpický spád Δi [kJ/kg]	pot. Teplo Q [kW]
Ekonomizér	out	163,3682	5,8	693,18294	248,6534363	2569,419
	in	105	5,95	444,52951		
Výparník	out	273,3886	5,8	2786,6967	1584,311246	16371,22
	in	273,3682	5,8	1202,3854		
Závěsné trubky	out	278,8624	5,8	2811,6967	25	258,3333
	in	273,3886	5,8	2786,6967		
Přehřívák I	out	343,9878	5,7	3034,7196	223,022934	2304,57
	in	278,8624	5,8	2811,6967		
Přehřívák II	out	381,3195	5,6	3137,9076	210	2263,333
	in	308,8284	5,7	2927,9076		
Přehřívák III	out	420	5,5	3237,1063	180	2000
	in	351,0481	5,6	3057,1063		



Obr.: 4.3.: Pilový diagram



## 5. Výpočet spalovací komory

Do spalovací komory je přiváděno palivo, které je zde spalováno za pomoci přiváděného primárního a sekundárního vzduchu. Dochází k hoření, při němž se uvolňuje teplo. Spaliny produkované spalováním jsou odváděny ze spalovací komory přes spalínovou mříž, která je umístěna v horní části kotle viz Obr. 5.2. Ve spalovací komoře dosahují teploty nejvyšších hodnot.

Plošné zatížení roštu volím po odborné konzultaci  $q_s = 1,1 \text{ MW/m}^2$ , z něhož stanovím základní rozměry roštu. Následně zvolím základní rozměry kotle tak abych dosáhl požadované teploty na konci spalovací komory a požadované stoupavé rychlosti spalin v ní.

### Výpočet plochy roštu

$$q_s = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{S_o} \rightarrow S_{ro} = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{q_s} = \frac{3,512 \cdot 9,5}{1,1} = 31,356 \text{ m}^2 \quad (5-1)$$

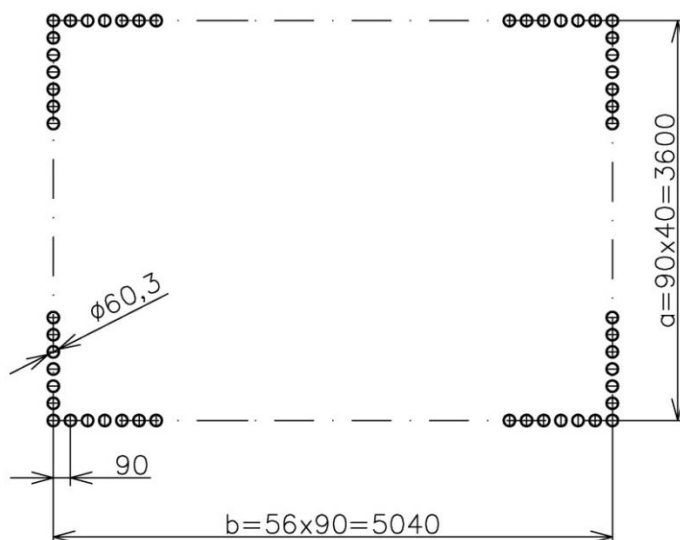
Šířku roštu volíme tak aby byl dělitelný 90 mm z důvodu rozteče mezi membránovými trubkami, a také 100 z důvodu širší rozteče v třetím tahu kde skrze membránovou stěnu vstupují trubky přehříváků. Šířku roštu volím  $\check{S}_{ro} = 3,6 \text{ m}$ .

### Výpočet délky roštu

$$L_{ro} = \frac{S_{ro}}{\check{S}_{ro}} = \frac{31,356}{3,6} = 8,7 \text{ m} \quad (5-2)$$

Při volbě rozměrů plochy je třeba vycházet z doporučení poměru stran ( $a/b \approx 0,8$ ). V mém případě je poměr stran 0,71. Rozměry byly zvoleny tak, aby bylo dosaženo požadované teploty na konci ohništi  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  a stoupavá rychlost spalin  $4,5 \text{ m/s}$ . Ostatní rozměry spalovací komory jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 5.1).

Volím:  $a = 3,6 \text{ m}$ ;  $b = 5,04 \text{ m}$



**Obr. 5.1:** Řez membránovou stěnou spalovací komory

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Střední teplota ohniště:

$$t_{st} = \frac{t_{ko} + t_{ad}}{2} = \frac{800 + 1492,992}{2} = 1146,46 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5-3)$$

Kde:  $t_{ko}$  ... množství skutečně spáleného paliva [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $t_{ad}$  ... střední celkové měrné teplo spalin [ $^\circ\text{C}$ ]

Teplotu spalin v ohništi, neboli také teplotu adiabatickou, dostaneme interpolací z tabulky entalpie spalin Tab. 2.3, pokud známe teplo uvolněné v ohništi. Skutečné teplo uvolněné v ohništi je vypočítáno níže (5-23).

Průřez prvního tahu:

$$S_{oh} = a \cdot b = 3,6 \cdot 5,04 = 18,144 \text{ m} \quad (5-4)$$

Kde:  $a$  ... navrhnutá šířka ohniště [m]  
 $b$  ... navrhnutá délka ohniště [m]

Skutečná rychlost spalin v prvním tahu:

$$w_{st} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot (273,15 + t_{st})}{273,15 \cdot S_{oh}} \quad (5-5)$$

$$w_{st} = \frac{4,2566 \cdot 3,5128 \cdot (273,15 + 1146,46)}{273,15 \cdot 18,144} = 4,283 \text{ m/s}$$

Kde:  $O_{sp}$  ... Skutečné množství spalin [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]  
 $M_{pv}$  ... skutečné množství paliva [ $\text{kg/s}$ ]

Skutečná stoupavá rychlost se od zvolené liší pouze nepatrně.

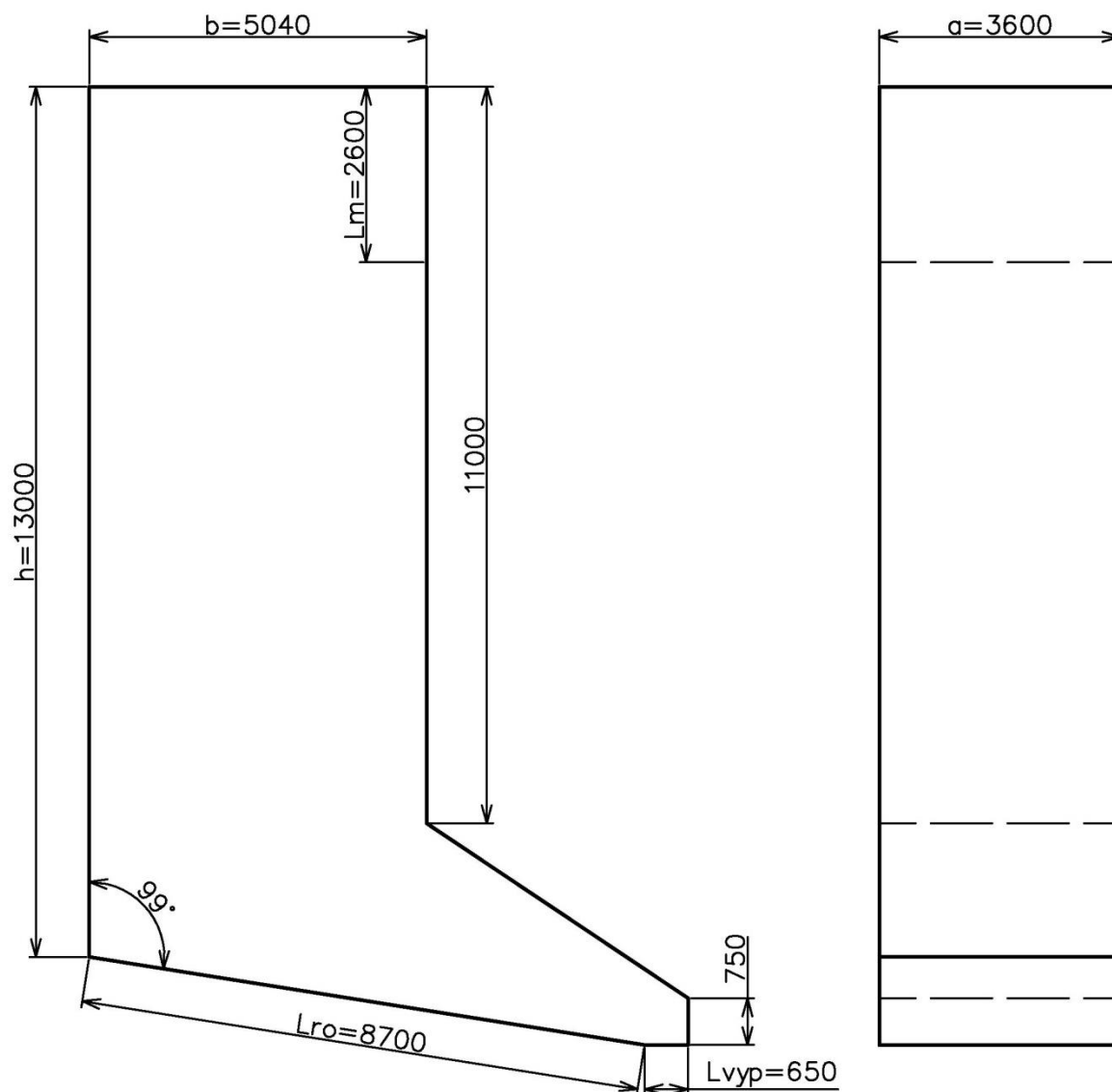
## 5.1. Návrh rozměrů spalovací komory

Z důvodu dodržení plošného zatížení roštu a zajištění stoupavé rychlosti je spalovací komora navržena ve tvaru písmene L. Iteračním procesem se dosáhlo požadované stoupavé rychlosti spalin a teploty na výstupu z ohniště.

**Tab. 5.1:** Zvolené rozměry prvního tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Šířka spalovací komory	$\check{S}_{ro}$	3,6	m
Délka roštu	$L_{ro}$	7,8	m
Výška spalovací komory	$h$	13	m
Délka spalovací komory	$L_l$	5,04	m
Velikost výpadu	$L_v$	0,65	m
Průměr trubek prvního tahu	$D_m$	60,3	mm
Rozteč trubek prvního tahu	$R_m$	90	mm

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene



Obr.: 5.2: Rozměry spalovací komory

## 5.1.1. Výpočet plochy a objemu

Celkový povrch stěn ohniště

Celková plocha stěn ohniště je aktivní teplosměnná plocha rozšířená o mříž a plochy, které teplo neodebírají, tedy rošt a výpad tuhých zbytků na konci roštu.

$$S_{coh} = 2 \cdot S_{bok} + S_{před} + S_{zad} + S_{vrch} + S_{ro} + S_{vyp} = \quad (5-6)$$

$$S_{coh} = 2 \cdot 73,97 + 46,8 + 59,54 + 18,144 + 31,356 + 2,34 = 306,1416 \text{ m}^2$$

Výpočet jednotlivých ploch včetně plochy a výšky spalinové mříže jsou vypočteny níže.

**Účinná plocha stěn ohniště**

Je plocha zmenšená o výpad, plochu mříže a roštu.

$$S_{aoh} = S_{coh} - S_{vyp} - S_{mriz} - S_{ro} \quad (5-7)$$

$$= 306,1416 - 2,34 - 9,387 - 31,356 = 263,0576 \text{ m}^2$$

**Objem spalovací komory**

$$V_0 = S_{bok} \cdot \check{S}_{ro} = 73,97 \cdot 3,6 = 266,3231 \text{ m}^3 \quad (5-8)$$

**Výška mříže**

Výška mříže se odvíjí od zvolené rychlosti spalin v mříži a množství proudících spalin. Podle rady konzultanta volím  $w_{sp} = 8 \text{ m/s}$ .

$$h_{mriz} = \frac{O_{SPskut}^V \cdot M_{pv}}{w_{sp} \cdot (a - z_1 \cdot D)} \cdot \frac{273 + t_{ko}}{273} \quad (5-9)$$

$$h_{mriz} = \frac{4,256 \cdot 3,512}{8 \cdot (3,6 - 13 \cdot 0,0603)} \cdot \frac{273 + 800}{273} = 2,6075 \rightarrow 2,6 \text{ m}$$

Kde:  $O_{SPskut}$  ... Skutečné množství spalin [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]  
 $D$  ... vnější průměr membránové trubky [m]  
 $z_1$  ... počet trubek v jedné řadě mříže  
 $M_{pv}$  ... skutečné množství paliva [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $w_{sp}$  ... zvolená rychlost na mříži [m/s]  
 $t_{ko}$  ... zvolená teplota na konci ohniště [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Přední strana:

$$S_{pred} = h \cdot \check{S}_{ro} = 13 \cdot 3,6 = 46,8 \text{ m}^3 \quad (5-10)$$

Vrchní strana:

$$S_{vrch} = L_I \cdot \check{S}_{ro} = 5,04 \cdot 3,6 = 18,144 \text{ m}^3 \quad (5-11)$$

Boční stěna:

$$S_{bok} = h \cdot L_I + S_{zv} = 13 \cdot 5,04 + 8,4586 = 73,9786 \text{ m}^3 \quad (5-12)$$

Plocha zvětšení:

Za pomoci goniometrických funkcí je vypočtena plocha zvětšení spalovací komory. Jedná se o zvětšení obvyklé obdélníkové plochy, v důsledku návrhu spalovací komory ve tvaru L.  $S_{zv} = 8,4586 \text{ m}^2$ .

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Zadní stěna:

$$S_{zad} = (h - 2 + l_{zv}) \cdot \check{S}_{ro} = (13 - 2 + 5,5399) \cdot 3,6 = 59,5437 \text{ m}^3 \quad (5-13)$$

Kde:  $l_{zv}$  ... zvětšení spalovací komory [m]Plocha roštu:

$$S_{ro} = L_{ro} \cdot \check{S}_{ro} = 7,8 \cdot 3,6 = 31,3566 \text{ m}^3 \quad (5-14)$$

Plocha výpadu:

$$S_{vyp} = L_v \cdot \check{S}_{ro} = 0,650 \cdot 3,6 = 2,34 \text{ m}^3 \quad (5-15)$$

Plocha mříže:

$$S_{mriz} = h_{mriz} \cdot \check{S}_{ro} = 2,6 \cdot 3,6 = 9,36 \text{ m}^3 \quad (5-16)$$

Plocha mříže je stanovena na základě optimální rychlosti spalin na mříži. Ta byla stanovena dle rady konzultanta na  $w = 8 \text{ m/s}$ . Počet vyhnutí mříže byl po konzultaci stanoven na  $n_{řad\ mriz} = 3$ . Mříž a způsob vyhnutí trubek je vyobrazen na obrázku Obr. 6.1.

Počet trubek ve stěně:

$$n_m = \frac{\check{S}_{ro}}{R_m} = \frac{3,6}{0,09} = 40 \quad (5-17)$$

Volná šířka mříže:

$$\check{S}_{mriz} = \check{S}_{ro} - D_m \cdot \frac{n_m - 1}{n_{řad\ mriz}} = 3,6 - 0,603 \cdot \frac{40 - 1}{3} = 2,816 \text{ m}^3 \quad (5-18)$$

## 5.2. Tepelný spalovací komory

Tepelný výpočet spalovací komory ověřuje zvolenou teplotu na jejím konci, přičemž vychází z tepla uvolněného v ohništi spálením skutečného množství paliva a velikosti teplosměnných ploch spalovací komory. Protože dílčí výpočty jednotlivých veličin jsou na teplotě závislé, jedná se o iterační výpočet. Výsledná teplota by se neměla od zvolené lišit o více než  $\pm 50$  °C dle [1].

Volená teplota na konci ohniště:

$$T_{ko} = 800 \text{ °C}$$

### 5.2.1. Skutečná teplota na výstupu z ohniště

$$t_{ko}^{skut} = \frac{t_{ad} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (5-19)$$

$$t_{ko}^{skut} = \frac{1492,922 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,72212}{0,60279}\right)^{0,6}} - 273,15 = 792,3321 \text{ °C}$$

Skutečná teplota se od zvolené liší o 7.667 °C, což je přijatelná odchylka.

### Součinitel M

Součinitel se mění v závislosti na poměrné výšce maximální hodnoty teploty plamene  $x_{pl}$ , pro spalování v tenké vrstvě je  $x_{pl} = 0$ .

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl} = 0,59 \text{ [-]} \quad (5-20)$$

### Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot c}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot S_{coh} \cdot (273,15 + t_{ad})^3} \quad (5-21)$$

$$Bo = \frac{0,99998 \cdot 3,512 \cdot 7,5217}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,456 \cdot 306,141 \cdot (273,15 + 1492,922)^3} = 0,60279$$

Kde:  $\varphi$  ... součinitel uchování tepla [-]  
 $M_{pv}$  ... množství skutečně spáleného paliva [kg/s]  
 $O_{sp} \cdot c$  ... střední celkové měrné teplo spalin [kJ/kgK]  
 $\psi$  ... střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn [-]  
 $F_{st}$  ... celkový povrch stěn ohniště [m<sup>2</sup>]  
 $t_{ad}$  ... adiabatická teplota v ohništi [°C]

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Součinitel uchování tepla:

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,001781}{89,71 + 0,001781} = 0,99998 \quad [-] \quad (5-22)$$

Střední celkové měrné teplo spalin:

$$O_{sp} \cdot c = \frac{I_u - I_0}{t_{ad} - t_{ko}} = \frac{10408,65 - 5196,691}{1492,922 - 800} = 7,521716 \text{ kJ/kgK} \quad (5-23)$$

Kde:  $I_u$  ... užitečné teplo uvolněné ve spalovací komoře  $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$   
 $I_0$  ... entalpie spalin na výstupu z ohniště  $[\text{kJ/kg}]$   
 $t_{ad}$  ... adiabatická teplota v ohništi, teplota odpovídající  $I_u$   $[\text{°C}]$

Součinitel tepelné efektivnosti stěn:

$$\psi = x_{\dot{u}} \cdot \zeta = 0,95 \cdot 0,48 = 0,456 \quad (5-24)$$

Kde:  $x_{\dot{u}}$  ... úhlový součinitel osálení stěn ohniště, pro membránové stěny  $x_{\dot{u}} = 0,95$  [1]  
 $\zeta$  ... součinitel zanesení stěn,  $\zeta = 0,48$  dle [1]

**5.2.2. Užitečné teplo uvolněné ve spalinách**

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{cn} - z_c - z_f}{100 - z_c} + Q_{vz} \quad (5-25)$$

$$I_u = 9526,072 \cdot \frac{100 - 0,08 - 3,249 - 0,245}{100 - 3,249} + 914,6362 = 10408,65 \text{ kJ/kg}$$

Kde:  $z_{cn}$  ... ztráta chemickým nedopalem [-]  
 $z_c$  ... ztráta mech. nedopalem [%]  
 $z_f$  ... ztráta fyz. teplem tuhých zbytků [%]  
 $Q_p^p$  ... teplo přivedené do kotle na 1 kg  $[\text{kJ/kg}]$   
 $Q_{vz}$  ... teplo přivedené do kotle se vzduchem  $[\text{kJ/kg}]$

Vzduch, přiváděný do kotle, je rozdělen v poměru 1:1 na primární o teplotě 200 °C a sekundární o teplotě taktéž 200 °C.

$$Q_{vz} = O_{vz,min}^v \cdot \alpha \cdot t_{200} \cdot c_{vz}^v = 3,432 \cdot 1,4 \cdot 200 \cdot 1,3324 = 914,6362 \text{ kJ/kg} \quad (5-26)$$

Kde:  $\alpha$  ... součinitel přebytku vzduchu [-]  
 $O_{vz,min}^v$  ... minimální množství vzduch  $[\text{Nm}^3/\text{kg}]$   
 $c_{vz}^v$  ... měrná tepelná kapacita vzduchu pro  $t = 200\text{°C}$   $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

### 5.2.3. Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{R}{F_{st}}\right)} \quad (5-27)$$

$$a_0 = \frac{0,504 + (1 - 0,504) \cdot \frac{23,517}{306,141}}{1 - (1 - 0,504) \cdot (1 - 0,456) \cdot \left(1 - \frac{23,517}{306,141}\right)} = 0,722128$$

Kde:  $a_{pl}$  ... *efektivní stupeň černosti plamene*  
 $R$  ... *plocha hořící vrstvy paliva na roštu [m<sup>2</sup>]*  
 $F_{st}$  ... *celková plocha stěn ohniště [m<sup>2</sup>]*

#### Efektivní stupeň černosti plamene:

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,24 \cdot 0,101 \cdot 3,131} = 0,504 \quad (5-28)$$

Kde:  $k$  ... *součinitel zeslabení sálání [-]*  
 $p$  ... *tlak v ohništi,  $p = 0,101$  Mpa, dle [1]*  
 $s$  ... *účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]*

#### Součinitel zeslabení sáláním::

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 \quad (5-29)$$

$$k = 1,96307 + k_p \cdot \mu + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 2,2406$$

Kde:  $k_{sp} \cdot r_{sp}$  ... *součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [m<sup>-1</sup>/MPa]*  
 $k_p \cdot \mu$  ... *součinitel zeslabení sálání popílkovými částmi [m<sup>-1</sup>/MPa]*  
 $k_k$  ... *součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi,  $k_k = 1$*   
 $\chi_1, \chi_2$  ... *součinitele závislé na druhu roštu a paliva,  $\chi_1 = 0,5, \chi_2 = 0,03$*

#### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ko} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (5-30)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,207}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 1,7611}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{800 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,96307 \text{ m}^{-1}/\text{MPa}$$

Kde:  $r_{H_2O}, r_{sp}$  ... *objemové části tříatomových plynů*  
 $p_{sp}$  ... *celkový parciální tlak [MPa]*



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Objemový podíl vody ve spalínách:

$$r_{H_2O} = \frac{O_{SP}^{H_2O \min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ \min}^S}{O_{SP \text{ skut}}^V} = \quad (5-31)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,86567 + (1,0168 - 1) \cdot (1,4 - 1) \cdot 2,41105}{4,25665} = 0,20724$$

Objemový podíl ostatních tříatomových plynů ve spalínách:

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP \text{ skut}}^V} = \frac{8,1934 \cdot 10^{-4} + 0,498}{4,25665} = 0,117187 \quad (5-32)$$

Objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách:

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,20724 + 0,117187 = 0,324427 \quad (5-33)$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách:

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101 \cdot 0,324427 = 0,032443 \quad (5-34)$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi:

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(t_{ko} + 273,15)^2 \cdot d_{\check{c}p}^2}} \cdot \mu \quad (5-35)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(800 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,2905 = 0,12753$$

Kde:  $\mu$  ... koncentrace popílku ve spalínách  
 $d_{\check{c}p}$  ... střední efektivní průměr částiček popílku,  $d_{\check{c}p} = 20 \mu m$  [1]

Koncentrace popílku ve spalínách:

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{SP \text{ skut}}^V} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 6,5}{4,25665} \cdot \frac{50}{100} = 2,290 \text{ g/m}^3 \quad (5-36)$$

Účinná tloušťka sálavé plochy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{266,323}{263,057} = 3,13176 \text{ m} \quad (5-37)$$

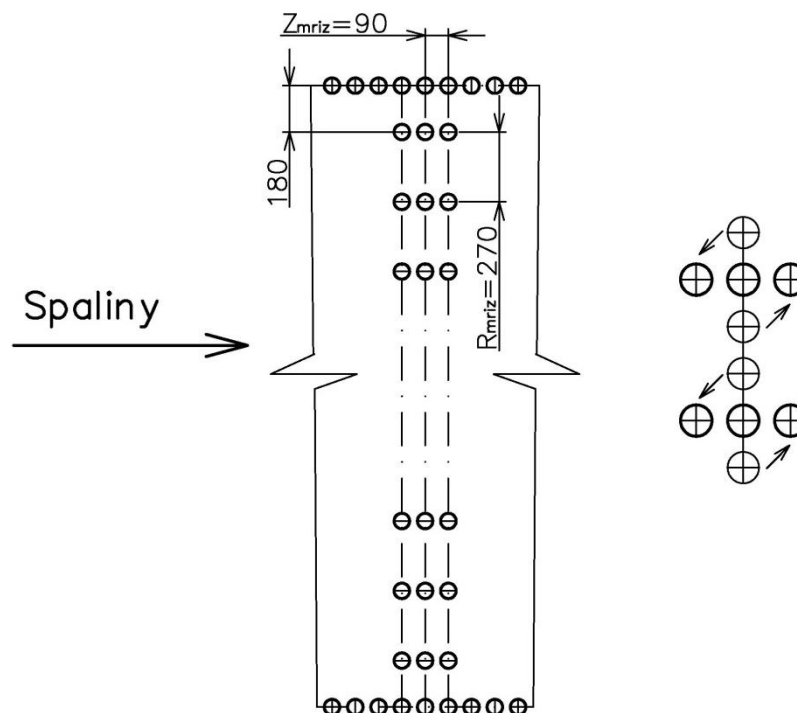
#### 5.2.4. Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn

$$Q_{st} = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_u - I_0) \quad (5-38)$$

$$Q_{st} = 3,512 \cdot 0,99998 \cdot (10408,65 - 5196,691) = 18498,57 \text{ kW}$$

## 6. Mříž

Mříž je součástí výparníku, je tvořena rozvolněním trubek zadní membránové stěny Spalovací komory. Mříž v kotli tvoří přechod mezi spalovací komorou a druhým tahem. Rozvolnění je realizováno vyhnutím a přesazením trubek ve směru toku spalin, takže vždy tvoří svazek tří trubek uspořádaných za sebou. Spaliny se průchodem mříží ochlazují.



Obr. 6.1: Řez princip rozvolnění membránové stěny

### 6.1. Tepelný výpočet mříže

Tepelný výpočet stanovuje množství odebraného tepla spalinám. Teplota na vstupu do mříže se rovná teplotě spalina na konci ohniště  $t_{ko}=792,3$  °C. Teplotu na konci mříže volíme odhadem, a pro střední teplotu vypočteme součinitel přestupu tepla ze strany spalin a součinitel přestupu tepla sáláním. Výšku rozvolnění mříže jsme již spočítaly, a to na základě rychlosti proudění spalin a ostatní rozměry jsou uvedeny v Tab. 6.1. a na Obr. 6.1.

Tab.: 6.1: Konstrukční parametry mříže

	značka	velikost	jednotka
výška mříže	$h_{mriz}$	2,6	m
Vnější průměr trubek	$D_{t\ mriz}$	0,0603	m
počet řad	$n_{mriz}$	3	-
počet trubek v řadě	$n_{t\ mriz}$	13	-
rozteč mezi řadami	$Z_{mriz}$	0,09	m
rozteč mezi trubkami	$R_{mriz}$	0,27	m

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Teplotu na konci ohniště volím na základě předchozího iteračního výpočtu:

$$t_{km} = 776,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{ko}^{skut} + t_{km}}{2} = \frac{792,33 + 776,3}{2} = 784,332 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6-1)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 784,332 + 273,15 = 1057,482 \text{ } \text{K} \quad (6-2)$$

Skutečná rychlost spalin vzhledem k zvolené výšce mříže

$$w_{sp} = \frac{O_{sp}^V \cdot M_{pv}}{h_{mriz} \cdot (a - n_{tr} \cdot D)} \cdot \frac{273 + t_{stř}^{sp}}{273} \quad (6-3)$$

$$w_{sp} = \frac{4,256 \cdot 3,5127}{2,6 \cdot (3,6 - 13 \cdot 0,0603)} \cdot \frac{273 + 784,332}{273} = 7,966 \text{ } \text{m/s}$$

**6.1.1. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**

Parametry spalin jsou stanoveny interpolací z tabulek dle[1] pro střední teplotu spalin proudících přes mříž a jsou vyneseny do tabulky 6.2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (6-4)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 0,9088 \cdot \frac{0,0981}{0,0603} \cdot \left( \frac{7,966 \cdot 0,0603}{0,000132} \right)^{0,65} \cdot 0,6515^{0,33}$$

$$\alpha_k = 48,7239 \text{ } \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde  $c_z$  ... *opravný součinitel na počet řad*

$c_s$  ... *opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči*

$\lambda_{sp}$  ... *součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]*

$\nu_{sp}$  ... *kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]*

$Pr_{sp}$  ... *prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [-]*

**Tab. 6.2:** Parametry spalin pro mříž

název	značka	velikost	jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp, mříž}$	0,09814888	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp, mříž}$	0,00013271	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prantlovo číslo	$Pr_{Sp, mříž}$	0,65156679	-

Opravný součinitel na počet řad:

Pro méně řad než 10 platí:

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{řad} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (6-5)$$

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (6-6)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,4925}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,9088$$

Rozteče jsou zvoleny na základě rady konzultanta

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,27}{0,0603} = 4,478 \rightarrow \sigma_1 = 3 \text{ dle [1] při } \sigma_1 > 3, \sigma_2 < 2 \quad (6-7)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,0603} = 1,493 \quad (6-8)$$

### 6.1.2. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{sp}^{stř}} \right)^4}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{sp}} \right)^4} \quad (6-9)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,21192 \cdot 1057,482^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{626,538}{1057,482} \right)^4}{1 - \left( \frac{626,538}{1057,482} \right)^4}$$

$$\alpha_s = 27,6608 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]

$a_{\check{c}}$  ... stupeň černosti proudu spalín

$T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]

$T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalín [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2405} = 0,21192 \quad (6-10)$$

Optická hustota spalin:

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (5,844 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,4075 = 0,2405 \quad (6-11)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot MPa^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi,  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101 MPa$   
 $s$  ... efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi se dle [1] zanedbává

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:

Objem částic vodní páry, objem části tříatomových plynů a jejich parciální tlak ve spalinách jsou stanovy v předchozích kapitolách (rovnice 5-30 až 5-33).

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \quad (6-12)$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,207}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,4075}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{784,332 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,8443$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,27 \cdot 0,09}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,4075 \text{ m} \quad (6-13)$$

Teplota povrchu trubek mříže:

$$t_z = t_{výp} + \Delta t = 273,3885 + 80 = 353,3885 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6-14)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 353,3885 + 273,15 = 626,5385 \text{ K} \quad (6-15)$$

Kde:  $\Delta t$  ... voleno dle [1] 80 °C  
 $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [°C]

### 6.1.3. Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 68,7463 = 41,2477 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-16)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity, [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (48,7239 + 27,6608) = 68,7463 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-17)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění

### 6.1.4. Tepelný výkon mříže

Teplosměnná plocha mříže

$$S_{mříž} = \pi \cdot D_m \cdot h_{mříž} \cdot (n_{tr} \cdot n_{rad} - 1) = \pi \cdot 0,0603 \cdot 2,6 \cdot (13 \cdot 3 - 1) \quad (6-18)$$

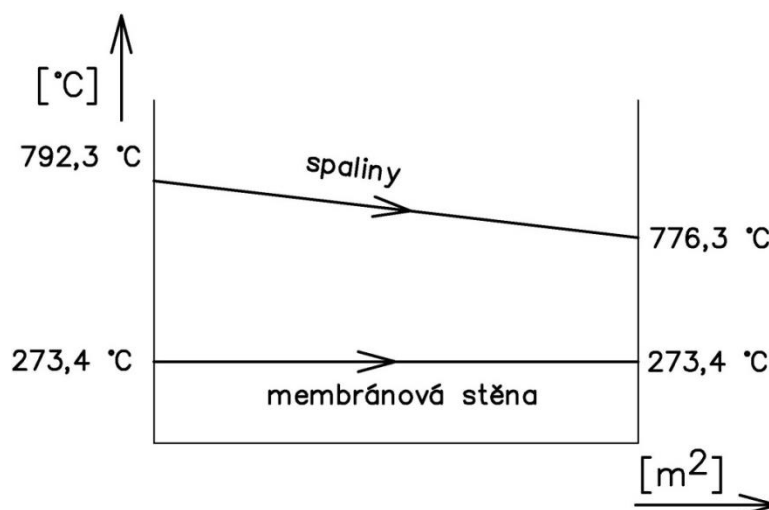
$$S_{mříž} = 19,209 \text{ m}^2$$

Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{518,9436 - 502,6115}{\ln \frac{518,9436}{502,6115}} = 510,9018 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6-19)$$

$$\Delta t_1 = t_{ko}^{skut} - t_{výp} = 792,3321 - 273,3885 = 518,9436 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6-20)$$

$$\Delta t_2 = t_{km} - t_{výp} = 776 - 273,3885 = 502,6115 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6-21)$$



**Obr.:6.2:** Tepelné schéma mřížeTeplo, které mříž odebere spalinám

$$Q_{mříž} = (S_{mříž} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}) / 1000 = (19,209 \cdot 41,2477 \cdot 510,9018) / 1000 \quad (6-22)$$

$$Q_{mříž} = 404,802 \text{ kW}$$

Teplo spalin na vstupu do mříže

$$Q_{sp\ m}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 5142,4613 \cdot 3,512 = 18064,31096 \text{ kW} \quad (6-23)$$

Kde:  $I_{sp}$  ... entalpie spalin na vstupu do mříže [kJ/kg]

Entalpie spalin na vstupu do mříže  $I_{sp}^{in} = 5142,4613 \text{ kJ/kg}$  je stanovena pomocí interpolace z tabulky 2.3 pro teplotu na konci spalovací komory.

Teplo spalin na výstupu z mříže

$$Q_{sp\ m}^{out} = Q_{sp\ m}^{in} - Q_{mříž} = 18064,31 - 404,802 = 17659,208 \text{ kW} \quad (6-24)$$

Entalpie spalin na výstupu z mříže

$$I_{sp\ m}^{out} = \frac{Q_{sp\ m}^{out}}{M_{pv}} = \frac{17659,208}{3,521} = 5027,224 \text{ kJ/kg} \quad (6-25)$$

**6.2. Přepočítání teploty spalin na výstupu z mříže:**

Skutečnou teplotu na výstupu z mříže zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro výstupní entalpii  $I_{sp\ m}^{out} = 5027,224 \text{ kJ/kg}$ . Skutečná teplota  $t_{km}^{skut} = 776,073 \text{ °C}$  se od zvolené liší o  $0,294 \text{ °C}$ , což přijatelná odchylka.



## 7. Výpočet II. tahu kotle

Kvůli vysoké teplotě spalin vystupující z mříže je druhý tah navržen jako prázdný a je tvořen pouze membránovou stěnou výparníku. Snížením teploty spalin před vstupem na konvekční svazky výhřevných ploch poklesne nebezpečí nalepování popílku. Zároveň dojde ke snížení množství popílkových částic ve spalinách, které jsou odvedeny výsypkou v obrátové komoře.

### 7.1. Základní parametry II. tahu

#### 7.1.1. Konstrukční rozměry II. tahu

Rozměry druhého tahu jsou voleny s ohledem na střední rychlost spalin. Tu jsem stanovil podle rady konzultanta na  $w_{sp} = 7 \text{ m/s}$ .

Volená teplota spalin na konci tahu:  $t_{kII} = 710 \text{ °C}$

Volené rozměry:  $a = \check{s}_{ro} = 3,6 \text{ m}$ ,  $b_{II} = 2,25 \text{ m}$

Jednotlivé rozměry a plochy jsou zobrazeny na Obr. 7.1, 7.2 níže. Stěny jsou tvořeny membránovou stěnou z trubek, o stejném průměru a rozteči, jako ve spalovací komoře.

Střední teplota spalin:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{km}^{skut} + t_{kII}}{2} = \frac{776,073 + 710}{2} = 743,0378 \text{ °C} \quad (7-1)$$

Plošný průřez spalin:

$$F_{spII} = \frac{O_{spskut}^v \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} \quad (7-2)$$

$$F_{spII} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{6} \cdot \frac{(273 + 743,0378)}{273} = 7,946817 \text{ m}^2$$

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{spskut}^v \cdot M_{pv}}{a \cdot b_{II}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} \quad (7-3)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{3,6 \cdot 2,25} \cdot \frac{(273 + 743,0378)}{273} = 6,8676 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Délka II. tahu:

$$b_{II} = \frac{F_{sp,II}}{a} = \frac{7,946}{3,6} = 2,207449 \rightarrow 2,25 \text{ m} \quad (7-4)$$

Délku tahu volím tak aby byla dělitelná 0,09 z důvodu rozteče membránových trubek.

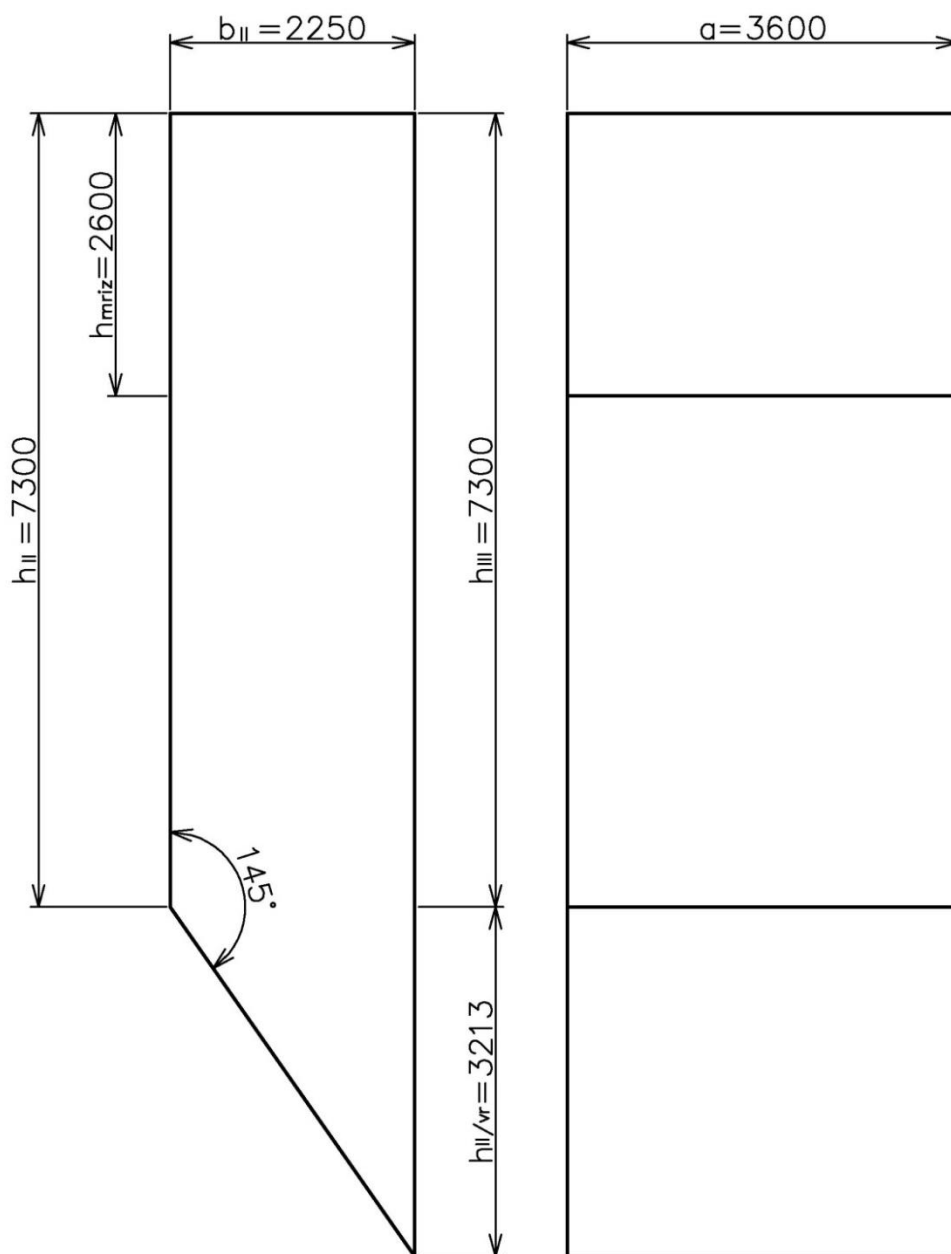
## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Plošný průřez spalin v nejužším místě:

$$F_{II \min} = \frac{O_{sp}^v \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} \quad (7-5)$$

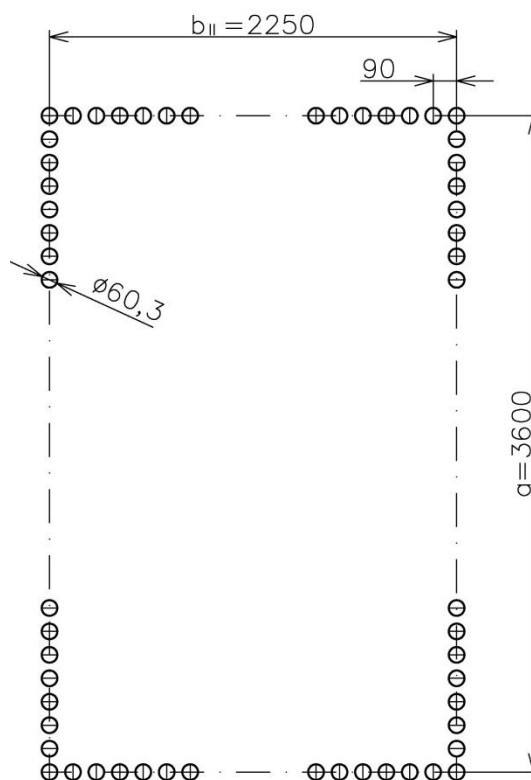
$$F_{II \min} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{8} \cdot \frac{(273 + 743,0378)}{273} = 1,9315 \text{ m}^2$$

Dle rady konzultanta by se měla hodnota rychlosti v nejužším místě pohybovat mezi 8-9 m/s. V mém případě volím výpočtovou rychlost 8 m/s.



**Obr.: 7.1:** Rozměry druhého tahu

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene



Obr. 7.2: Řez membránovou stěnou II. tahu

Vrchní stěna  $S_{vrch}$ :

$$S_{vrch} = b_{II} \cdot a = 2,25 \cdot 3,6 = 8,1 \text{ m}^2 \quad (7-6)$$

Spodní stěna  $S_{spod}$ :

$$S_{spod} = a \cdot \frac{b_{II}}{\sin \beta} = 3,6 \cdot \frac{2,25}{\sin 35^\circ} = 14,1219 \text{ m}^2 \quad (7-7)$$

Přední stěna  $S_{pred}$ :

$$S_{pred} = \left( h_{III} + \frac{b_{II}}{\tan \beta} \right) \cdot a = \left( 7,3 + \frac{2,25}{\tan 35^\circ} \right) \cdot 3,6 = 37,848 \text{ m}^2 \quad (7-8)$$

Boční stěna  $S_{bok}$ :

$$S_{bok} = h_{II} \cdot b_{II} + \frac{b_{II} \cdot \frac{b_{II}}{\tan \beta}}{2} = 7,3 \cdot 2,25 + \frac{2,25 \cdot \frac{2,25}{\tan 35^\circ}}{2} = 22,209 \text{ m}^2 \quad (7-9)$$

Zadní stěna  $S_{zad}$ :

$$S_{zad} = h_{II} \cdot a = 7,3 \cdot 3,6 = 26,28 \text{ m}^2 \quad (7-10)$$

Objem druhého tahu:

$$V = S_{bok} \cdot a = 22,209 \cdot 3,6 = 79,9524 \text{ m}^3 \quad (7-11)$$

Celková plocha druhého tahu:

$$S_c = 2 \cdot S_b + S_p + S_z + S_v + S_s + S_{TII/vr}$$

$$S_c = 2 \cdot 22,209 + 37,848 + 26,28 + 8,1 + 14,1219 + 11,568 \quad (7-12)$$

$$S_c = 130,7679 \text{ m}^2$$

Celková aktivní otrubkovaná plocha druhého tahu:

Aktivní plocha druhého tahu je celková otrubkovaná plocha bez spalinové mříže.

$$S_{akt} = S_c - S_{mriz} - S_{TII/vr} = 130,7697 - 9,3873 - 11,568 = 109,8126 \text{ m}^2 \quad (7-13)$$

### 7.1.2. Ověření rychlosti spalin v nejužším místě

Skutečná průtočná plocha v nejužším místě:

$$F_{II \min}^{skut} = a \cdot b_{II} \cdot \sin 55^\circ = 3,6 \cdot 2,25 \cdot \sin 55^\circ = 6,6351 \text{ m}^2 \quad (7-14)$$

Skutečná rychlost spalin v nejužším místě:

$$w_{spII \min}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{II \min}^{skut}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} \quad (7-15)$$

$$w_{spII \min}^{skut} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{6,6351} \cdot \frac{(273 + 743,0378)}{273} = 8,3838 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná rychlost je v rozmezí 8-9 m/s stanovené po konzultaci. Rychlost tedy vyhovuje.

## 7.2. Tepelný výpočet membránové stěny II. tahu

Tepelný výpočet stanovuje množství odebraného tepla spalinám v prostoru druhého tahu.

Tab. 7.1: Parametry spalin pro II. tah

	značka	velikost	jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp, II}$	0,094061	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp, II}$	0,000124	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp, II}$	0,655696	-

### 7.2.1. Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin

Jednotlivé parametry spalin pro druhý tah jsou v tabulce 7.1.

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (7-16)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,09406}{2,7168} \cdot \left( \frac{6,8676 \cdot 2,7168}{0,000124} \right)^{0,8} \cdot 0,6556^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 =$$

$$\alpha_k = 9,324 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... **opravné koeficienty** [1]

$\lambda_{sp}$  ... **součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin** [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... **kinematická viskozita pro střední teplotu spalin** [ $m^2/s$ ]

$Pr_{sp}$  ... **prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin** [-]

$d_e$  ... **ekvivalentní průměr** [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot a \cdot b_{II}}{O} = \frac{4 \cdot 3,6 \cdot 2,25}{2 \cdot (3,6 + 2,25)} = 2,7168 \text{ m} \quad (7-17)$$

### 7.2.2. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} \quad (7-18)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,4184 \cdot 1016,188^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{610,7435}{11016,188} \right)^4}{1 - \left( \frac{610,7435}{11016,188} \right)}$$

$$\alpha_s = 49,0884 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... **stupeň černosti povrchu stěn**,  $a_{st} = 0,8$  [1]

$a_{\check{c}}$  ... **stupeň černosti proudu spalin**

$T_z$  ... **teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách** [K]

$T_{stř}^{sp}$  ... **střední teplota spalin** [K]

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,5474} = 0,4184 \quad (7-19)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (2,4625 + 0) \cdot 0,101 \cdot 2,201 = 0,5474 \quad (7-20)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot MPa^{-1}$ ] $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, $p$  ... tlak,  $p = 0,101 MPa$  $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbáváme.

Zeslabení účinná tloušťka sálové vrstvy:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-21)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 2,201}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{743,037 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 2,4625$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_c} = 3,6 \cdot \frac{79,9524}{130,7679} = 2,201 \text{ m} \quad (7-22)$$

Kde:  $V$  ... objem sálající vrstvy [ $m^3$ ] $S_c$  ... povrch stěn sálající vrstvy [ $m^2$ ]Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

$$t_z = t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{akt}} \quad (7-23)$$

$$t_z = 273,388 + 0,0043 \cdot \frac{3,512 \cdot (5027,224 - 4560,455)}{109,8126}$$

$$t_z = 337,5935 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 337,5935 + 273,15 = 610,7435 \text{ K} \quad (7-24)$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení nmembránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0043$  $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [ $^\circ\text{C}$ ] $S_{akt}$  ... součet všech výhřevných ploch v tahu [ $m^2$ ]

**7.2.3. Součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 52,5712 = 31,5427 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-25)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (9,324 + 49,0884) = 52,5712 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-26)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

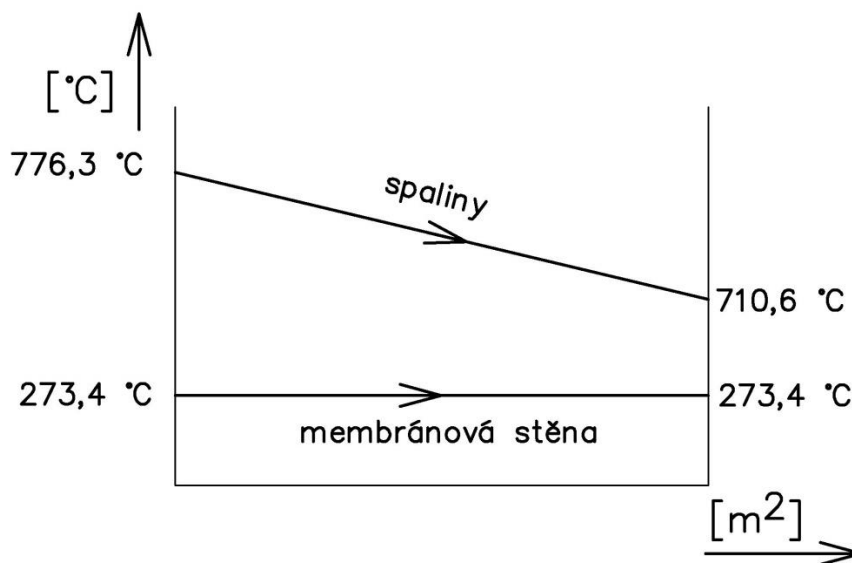
**7.2.4. Tepelný výkon v II. tahu**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{502,6498 - 436,612}{\ln \frac{502,6498}{436,612}} = 468,8754 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7-27)$$

$$\Delta t_1 = t_{km}^{skut} - t_{výp} = 776,0378 - 273,388 = 502,6498 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{kII} - t_{výp} = 710 - 273,388 = 436,612 \text{ } ^\circ\text{C}$$



*Obr. 7.4: tepelné schéma II. tahu*

Teplo odebrané spalínám ve II. tahu:

$$Q_{II} = \frac{S_{akt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{109,8126 \cdot 31,5427 \cdot 468,8754}{1000} \quad (7-28)$$

$$Q_{II} = 1624,085 \text{ kW}$$

Teplo spalin na vstupu do II. Tahu:

$$Q_{sp II}^{in} = Q_{sp m}^{out} = 5027,224 \cdot 3,512 = 17659,51 \text{ kW} \quad (7-29)$$

Teplo spalin na výstupu z II. tahu:

$$Q_{sp II}^{out} = Q_{sp II}^{in} - Q_{II} = 17659,51 - 1624,085 = 16035,42 \text{ kW} \quad (7-30)$$

$$I_{sp II}^{out} = \frac{Q_{sp II}^{out}}{M_{pv}} = \frac{16035,42}{3,512} = 4564,887 \text{ kJ/kg}$$

### 7.2.5. Přepočítání teploty spalin na výstupu z II. tahu

Skutečnou teplotu na výstupu z II. tahu zjistím lineární interpolací z Tab. 2.3 pro entalpii  $I_{sp II}^{out} = 4564,887 \text{ kJ/kg}$  je skutečná teplota spalin  $t_{k II}^{skut} = 710,6645 \text{ °C}$ . Výstupní teplota z druhého tahu se liší o  $0,6266 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka od zvolené teploty



## 8. Výpočet III. tahu kotle

Ve 3. Tahu kotle jsou umístěny přehříváky PIII, PII a PIb, ty jsou zavěšeny na závěsných trubkách, ty jsou chlazeny sytou párou z bubnu. Výpočet třetího tahu se skládá ze čtyř částí. V první se počítá prostor vratné komory tj. membránová stěna a výstupní část závěsných trubek. V druhé části se počítá trubkový svazek přehříváku III. a membránová stěna se závěsnými trubkami pro danou část třetího tahu. To samé se zopakuje pro prostor přehříváku II. a druhé části přehříváku I. Mezi jednotlivými trubkovými svazky přehříváků je prostor pro servisní vlez o výšce  $h = 0,7$  m.

Tah je stejně jako tahy předchozích tvořen membránovou stěnou a je součástí výparníku, přičemž rozteč membránových trubek na zadní straně je rozšířena na 100 mm, z důvodu vstupu trubek přehříváků. Šířka tahu je stejná jak u spalovací komory a to  $a = 3,6$  m

### 8.1. Výpočet délky III. tahu

Délku třetího tahu vypočítáme tak, že si zvolíme rychlost proudu spalin v místě, kde ji předpokládáme největší. V mém případě to je v prostoru přehříváku II. Dle rady konzultanta volím rychlost spalin na přehříváku II.  $w_{sp} = 6,5$  m/s. Rozměry a parametr přehříváku II. Jsou v Tab. 8.8, Tab. 8.9 a na Obr. 8.7. Střední teplota spalin v prostoru přehříváku II. Byla odhadnuta na 590 °C.

Plošný průřez spalin:

$$F_{sp} = \frac{O_{sp_{skut}}^v \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273,15 + t_{sp_{PII}}^{st})}{273,15} \quad (8-1)$$

$$F_{sp} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{6,5} \cdot \frac{(273,15 + 590)}{273,15} = 7,2692 m^2$$

Kde:  $t_{sp_{PII}}^{sp}$  ... teplota zvolená na vstupu do přehříváku II  
 $w_{sp}$  ... rychlost spalin zvolená do přehříváku II

Délka  $b_{III}$ :

$$b_{III} = \frac{F_{sp} + n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4}}{a - n_{tr} \cdot D} = \frac{7,2692 + 36 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4}}{1,8 - 36 \cdot 0,038} = 3,2385 \rightarrow 3,24 \text{ m} \quad (8-2)$$

Kde:  $n_{zt}$  ... celkový počet závěsných trubek  
 $n_{tr}$  ... počet trubek přehříváku II v jedné řadě  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku II [m]

Délka tahu musí být dělitelná číslem 0,09 z důvodu rozteče membránové stěny. Rozměry závěsných trubek jsou uvedeny v Tab. 8.2.

## 8.2. Výpočet I. části III. tahu (obratové komory)

První část třetího tahu je tvořena vratnou komorou. Do vratné komory proudí spaliny z druhého tahu, otáčí se a vstupují na výhřevné plochy přehříváků. Ve vratné komoře je koncipována výsypka popílku z prvních třech tahu, který unikne z ohniště spalovací komory. Teplota spalin na vstupu je rovna teplotě spalin vystupujících z II. tahu  $t_{kII}^{skut} = 710,6645 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 8.2.1. Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin

Zvolená výstupní teplota:

$$t_{k1III} = 670,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin v 1. části III. tahu

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{kII}^{skut} + t_{k1III}}{2} = \frac{710,6645 + 670,6}{2} = 690,6645 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-3)$$

$$T_{sp}^{stř} = t_{sp}^{stř} + 273,15 = 690,664 + 273,15 = 963,814 \text{ K} \quad (8-4)$$

Plošný průřez spalin v 1. části III. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{III} - n_{zt} \cdot D_{zt} \cdot b_{III} = 3,6 \cdot 3,24 - 18 \cdot 0,038 \cdot 3,24 = 9,4478 \text{ m}^2 \quad (8-5)$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek v jedné řadě  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]

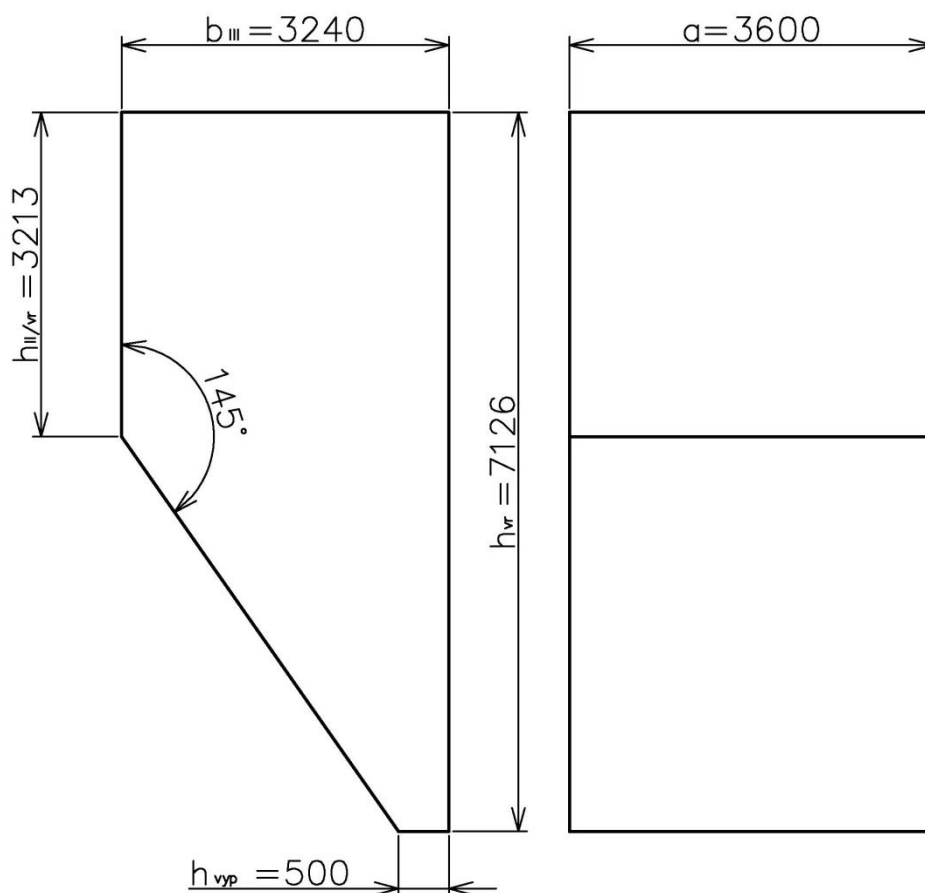
Skutečná rychlost spalin

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{stř})}{273} \quad (8-6)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{9,4478} \cdot \frac{(273 + 690,6645)}{273} = 5,5844 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

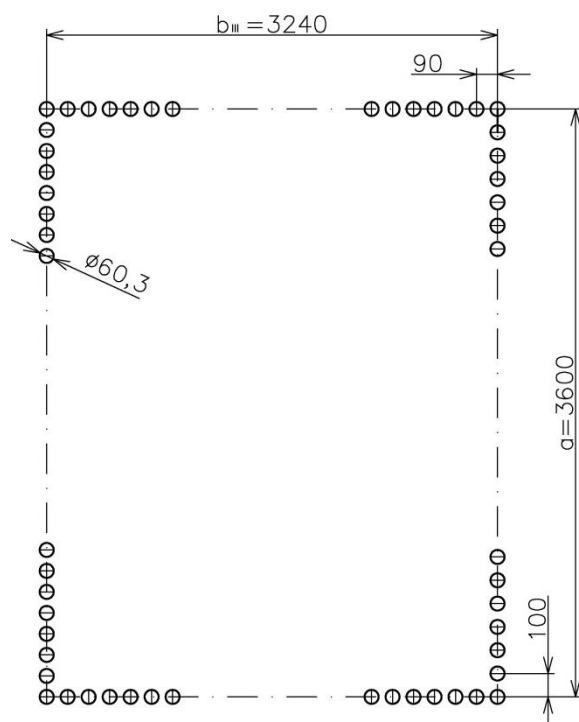
### 8.2.2. Návrh rozměrů vratné komory

Jednotlivé rozměry vratné komory jsou zobrazeny na Obr. 8.1 a 8.2. Stěny vratné komory jsou stejnou membránovou stěnou jako druhý tah, jenom na zadní straně je rozteč membránových trubek  $R_{vr} = 100$  mm. Rozteč je zvětšena z toho důvodu, že zadní stěnou vstupují trubky třetího, druhého a druhé části prvního přehříváku do prostoru třetího tahu. V dolní části vratné komory je koncipována výsypka popílku. Šířka vratné komory je stejná jako celého III. tahu a je rovna šířce roštu 3,6 m.



**Obr. 8.1:** Rozměry vratné komory

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene



Obr. 8.2: Řez membránovou stěnou III. tahu

Vrchní stěna  $S_{vrch}$ 

$$S_{vrch} = b_{III} \cdot a = 3,24 \cdot 3,6 = 11,664 \text{ m}^2 \quad (8-7)$$

Spodní stěna  $S_{spod}$ :

$$S_{spod} = a \cdot h_{vyp} = 3,6 \cdot 0,500 = 1,8 \text{ m}^2 \quad (8-8)$$

Přední stěna  $S_{pred}$ :

$$S_{pred} = h_{II/vr} \cdot a + a \cdot \frac{b_{III} - h_{vyp}}{\cos 55^\circ} = 3,213 \cdot 3,6 + 3,6 \cdot \frac{3,24 - 0,5}{\cos 55^\circ} = 28,7653 \text{ m}^2 \quad (8-9)$$

Boční stěna  $S_{bok}$ :

Plocha boční strany vratné komory byla stanovena na základě goniometrických funkcí na  $S_{bok} = 17,7287 \text{ m}^2$ .

Zadní stěna  $S_{zad}$ :

$$S_{zad} = a \cdot (h_{II/vr} + (b_{III} - h_{vyp}) \cdot \tan 55^\circ)$$

$$S_{zad} = 3,6 \cdot (3,213 + (3,24 - 0,5) \cdot \tan 55^\circ) = 25,6552 \text{ m}^2 \quad (8-10)$$

Objem vratné komory

$$V = S_{bok} \cdot a = 17,7287 \cdot 3,6 = 63,8234 \text{ m}^3 \quad (8-11)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Celková plocha vratné komory:

$$S_c = 2 \cdot S_{bok} + S_{pred} + S_{zad} + S_{vrch} + S_{spod}$$

$$S_c = 2 \cdot 17,7287 + 28,7653 + 25,6552 + 11,664 + 1,8 \quad (8-12)$$

$$S_c = 103,3421 \text{ m}^2$$

Celková aktivní otrubkovaná plocha vratné komory:

$$S_{akt} = S_c - S_{vyp} - S_{\frac{T_{II}}{vr}} - S_{vrch}$$

$$S_{akt} = 103,3421 - 1,8 - 9,3873 - 11,664 = 78,31 \text{ m}^2 \quad (8-13)$$

**8.2.3. Výpočet membránové stěny****Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin:**

Parametry spalin pro střední teplotu spalin vratné komory jsou v tab. 8.1 níže.

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-14)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,8889}{3,4105} \cdot \left( \frac{5,5844 \cdot 3,4105}{0,000113} \right)^{0,8} \cdot 0,6618^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 7,70853 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1] $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [-] $d_e$  ... ekvivalentní průměr [m]Ekvivalentní průměr kanálu:

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 9,44778}{13,68} = 3,4105 \text{ m} \quad (8-15)$$

Kde:  $O$  ... obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot (3,6 + 3,24) = 13,68 \text{ m} \quad (8-16)$$

**Tab. 8.1:** Parametry spalin 1. části III. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp, vr}$	0,088894	$\text{W}^* \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp, vr}$	0,000113	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp, vr}$	0,661867	-

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-17)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,4296 \cdot 963,814^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{546,592}{963,814}\right)^4}{1 - \left(\frac{546,592}{963,814}\right)}$$

$$\alpha_s = 40,86743 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

**Stupeň černosti proudu spalin:**

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,567} = 0,4296 \quad (8-18)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (2,5251 + 0) \cdot 0,101 \cdot 2,2233 = 0,567 \quad (8-19)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101 \text{ MPa}$   
 $s$  ... efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbáváme.

**Součinitel zeslabení sáláním:**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8-20)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 2,2233}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{690,664 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 2,5251$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_c} = 3,6 \cdot \frac{63,8234}{103,342} = 2,2233 \text{ m} \quad (8-21)$$

Kde:  $V$  ... objem sálající vrstvy [ $m^3$ ]  
 $S_c$  ... povrch stěn sálající vrstvy [ $m^2$ ]

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

$$t_z = t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp\ vr}^{in} - I_{sp\ vr}^{out})}{S_{akt}} = \quad (8-22)$$

$$= 273,388 + 0,0043 \cdot \frac{3,512 \cdot (4564,887 - 4285,762)}{78,31} = 273,442 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 273,442 + 273,15 = 546,592 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-23)$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení nmembránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0043$   
 $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $S_{akt}$  ... součet všech výhřevných ploch membránové stěny [ $m^2$ ]  
 $I_{sp\ vr}^{in}$  ... entalpie spalin na vstupu do vratné komory  
 $I_{sp\ vr}^{out}$  ... entalpie spalin na výstupu do vratné komory

**Součinitel prostupu tepla membránové stěny**

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 43,7183 = 26,231 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-24)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,73 \cdot (7,7085 + 40,8674) = 43,7183 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-25)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon membránové stěny vratné komory**Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{437,2765 - 396,612}{\ln \frac{437,2765}{396,612}} = 416,9562 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-26)$$

$$\Delta t_1 = t_{kII}^{skut} - t_{výp} = 710,6645 - 273,388 = 437,2765 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k1III} - t_{výp} = 670,6 - 273,388 = 396,612 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Teplu odebrané spalinám membránovou stěnou vratné komory:

$$Q_{ms1 III} = \frac{S_{akt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} \quad (8-27)$$

$$Q_{ms1 III} = \frac{78,31 \cdot 43,7183 \cdot 416,9562}{1000} = 856,492 \text{ kW}$$

#### 8.2.4. Výpočet závěsných trubek

V prostoru vratné komory jsou závěsné trubky ohnuté tak, že spaliny proudí příčně kolem nich. Trubky jsou vyvedeny zadní stěnou vratné komory mimo prostor III. tahu. Rozměry trubek jsou uvedeny v Tab. 8.2 a jejich hodnoty jsou brány pro všechny následující výpočty. Postup výpočtu je následující. Závěsné trubky jsou zapojeny v protiproudu, proto vždy zvolíme teplotu páry na vstupu do trubek a následně ji iterační výpočtem ověříme. Parametry páry závěsných trubek včetně jejich teplot jsou v Tab. 8.3.

**Tab. 8.2:** Rozměry závěsných trubek

	Značka	Velikost	Jednotka
Vnější průměr trubek	$D_{zt}$	0,038	m
Tloušťka stěny trubek	$tl_{zt}$	0,006	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{zt}$	0,026	m
Příčná rozteč	$S_1$	0,2	m
Podélná rozteč	$S_2$	0,15	m
Počet trubek v jedné řadě	$n_{tr}$	18	-
Počet řad	$n_{řzt}$	2	-

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin závěsných trubek

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (8-28)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0888}{0,038} \cdot \left( \frac{5,5844 \cdot 0,038}{0,000113} \right)^{0,65} \cdot 0,6618^{0,33}$$

$$\alpha_k = 54,7605 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad

$c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Opravný součinitel na počet podélných řad:

Podle [1] pro počet řad menší než 10 platí:

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{rad} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (2 - 2) = 0,91 \quad (8-29)$$

Opravný součinitel na uspořádání svazku:Volím  $c_s = 1$  dle [1] z důvodu  $\sigma_2 \geq 2$ Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,2}{0,038} = 5,263 \quad (8-30)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,038} = 3,947 \quad (8-31)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry**

Parametry páry jsou stanoveny pro střední teplotu páry v závěsných trubkách, dle [1] a jsou vyneseny v Tab. 8.3.

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-32)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0554}{0,026} \cdot \left( \frac{19,3606 \cdot 0,026}{6,8562 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,298^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 2596,7727 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1] $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-] $d_{zt}$  ... vnitřní průměr [m] $w_p$  ... rychlost proudění páry [m/s]Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,026^2}{4} \cdot 36 = 0,019113 \text{ m}^2 \quad (8-33)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,93 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,95 \cdot 11,111 \cdot 0,0343}{0,019113} = 18,572 \text{ m/s} \quad (8-34)$$

Tab. 8.3: Parametry páry pro závěsné trubky vratné komory

	Značka	Velikost	Jednotka
Vstupní teplota páry	$t_{zt\ in}$	275,86	°C
Výstupní teplota páry	$t_{zt\ out}$	278,86	°C
Střední teplota páry	$t_{zt\ st}$	277,36	°C
Střední teplota páry	$T_{zt\ st}$	550,51	K
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p\ zt}$	0,055483	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p\ zt}$	2E-05	$N \cdot s \cdot m^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p\ zt}$	1,298037	-
Měrný objem	$V_{p\ zt}$	0,034353	$m^3/kg$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p\ zt}$	6,86E-07	$m^2 \cdot s^{-1}$

**Součinitel přestupu tepla sáláním závěsných trubek**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-35)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3038 \cdot 963,8145^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{627,781}{963,8145}\right)^4}{1 - \left(\frac{627,781}{963,8145}\right)}$$

$$\alpha_s = 32,8214 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

**Stupeň černosti proudu spalin:**

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,3657} = 0,3038 \quad (8-36)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (4,1605 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,8704 = 0,3657 \quad (8-37)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot MPa^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101 MPa$   
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbávám.

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8-38)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,03244 \cdot 0,8704}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{690,664 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,1605$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D_{zt} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{zt}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,15}{0,038^2} - 1 \right) = 0,8705 \text{ m} \quad (8-39)$$

Kde:  $V$  ... objem sálové vrstvy [ $m^3$ ]  
 $S_c$  ... povrch stěn sálové vrstvy [ $m^2$ ]

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

Vstupní a výstupní entalpie je stanovena z parních tabulek [3] jako funkce zvolených teplot a tlaků na vstupu a výstupu do dané části závěsných trubek.

$$t_z = t_{zt}^{stř} + \left( \varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} \quad (8-40)$$

$$t_z = 277,362 + \left( 0,0035 + \frac{1}{2596,7} \right) \cdot \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot (2798,2 - 2811,69)}{6,9622} \cdot 1000$$

$$t_z = 354,631 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 354,631 + 273,15 = 627,781 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-41)$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení nmembránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0035$   
 $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $S_{zt}$  ... plocha závěsných trubek [ $m^2$ ]

Plocha závěsných trubek:

Plocha je dělena dvěma z důvodu, že spalinový kanál příčně protíná jen část trubek řady vzdálenější od zadní stěny vratné komory.

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot \frac{b_{III}}{2} \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot \frac{3,24}{2} \cdot 36 = 6,9622 \text{ m}^2 \quad (8-42)$$

**Součinitel prostupu tepla závěsných trubek vratné komory:**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 78,8238}{1 + \frac{78,8238}{2596,7727}} = 45,901 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-43)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (54,7605 + 32,8214) = 78,8238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-44)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon závěsných trubek vratné komory**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{431,8025 - 394,138}{\ln \frac{431,8025}{394,138}} = 413,0259 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-45)$$

$$\Delta t_1 = t_{kII}^{skut} - t_{zt}^{out} = 710,6645 - 278,862 = 431,8025 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k1 III} - t_{zt}^{in} = 670,6 - 275,862 = 394,138 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplu odebrané spalinám závěsnými trubkami v 1. části III. tahu:

$$Q_{zt1 III} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{6,962 \cdot 45,901 \cdot 413,025}{1000} \quad (8-46)$$

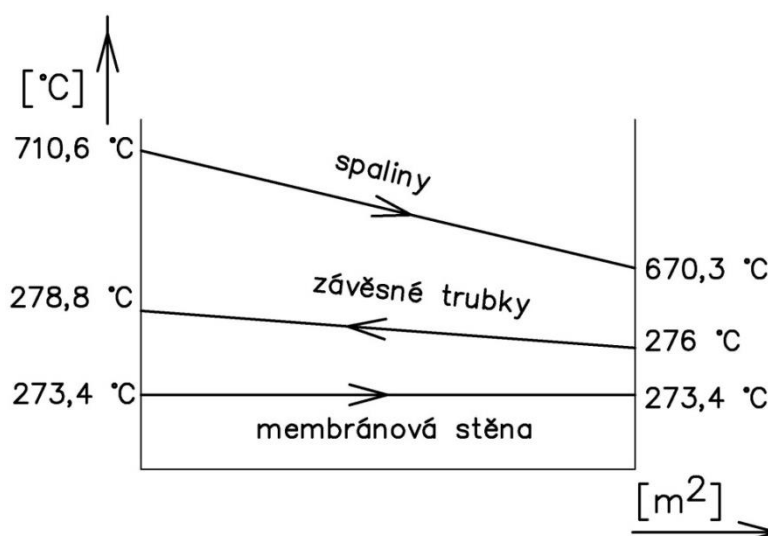
$$Q_{zt1 III} = 131,992 \text{ kW}$$

**Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek**

$$I_{zt1 III}^{in skut} = I_{zt1 III}^{out} - \frac{Q_{zt1 III}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2811,696 - \frac{131,992}{0,93 \cdot 11,111} = 2798,923 \text{ kJ/kg} \quad (8-47)$$

Z tabulek vlastností vody a páry [3] zjistíme teplotu pro vypočtenou skutečnou vstupní entalpii. Teplota je rovna  $t_{zt1 III}^{in skut} = 276,002 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Vypočtená teplota se liší o 0,1396  $^\circ\text{C}$  od zvolené, což je přijatelná odchylka.

## 8.2.5. Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu



Obr. 8.3: Tepelné schéma 1. části III. Tahu

Teplo odebrané spalinám v 1. části III. tahu:

$$Q_{1 III} = Q_{zt1 III} + Q_{ms1 III} = 131,992 + 856,492 = 988,454 \text{ kW} \quad (8-48)$$

Teplo spalin na vstupu do 1. části III. tahu:

$$Q_{sp1 III}^{in} = Q_{sp1 II}^{out} = 4564,8873 \cdot 3,512 = 16035,4233 \text{ kW} \quad (8-49)$$

**Teplo spalin na výstupu z 1. části III. tahu:**

$$Q_{sp1 III}^{out} = Q_{sp1 III}^{in} - Q_{1 III} = 16035,4233 - 988,454 = 15046,938 \text{ kW} \quad (8-50)$$

$$I_{sp1 III}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{15046,938}{3,512} = 4283,4901 \text{ kJ/kg} \quad (8-51)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 1. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp1 III}^{out} = 4283,4901 \text{ kJ/kg}$  a ta je  $t_{k1 III}^{skut} = 670,337 \text{ °C}$ . Skutečná teplota se liší od výpočtové o  $0,327 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka.

### 8.3. Výpočet II. části III. tahu (přehříváku III.)

V druhé části třetího tahu je umístěn trubkový svazek třetího přehříváku a závěsné trubky, chlazené sytou párou z bubnu. Jednotlivé rozměry výhřevných ploch jsou na obrázku 8.4 a v tabulce 8.5. Prostor 2. části III. tahu je tvořen membránovými stěnami, které jsou součástí výparníku, trubkovým svazkem III. přehříváku a závěsnými trubkami, jejichž rozměry jsou v Tab. 8.2 předchozí kapitoly.

Trubky třetího přehříváku jsou rozvolněny na rozteč  $R_{t\text{ PIII}} = 200$  mm, aby se předešlo přílišnému zanášení trubkového svazku. Výpočet spočívá ve zvolení výstupní teploty spalin na konci části tahu a její zpětné ověření tepelným výpočtem.

#### 8.3.1. Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin

Vstupní teplota do 2. části III. tahu je rovna teplotě  $t_{k1\text{ III}}^{\text{skut}} = 670,337$  °C. Odhadovaná teplota na konci 2. části III tahu je  $t_{k2\text{ III}} = 581,3$  °C

Střední teplota spalin v 2. části III. tahu:

$$t_{sp}^{\text{stř}} = \frac{t_{k1\text{ III}}^{\text{skut}} + t_{k2\text{ III}}}{2} = \frac{670,3372 + 581,3}{2} = 625,8732 \text{ °C} \quad (8-52)$$

$$T_{sp}^{\text{stř}} = t_{sp}^{\text{stř}} + 273,15 = 625,8732 + 273,15 = 898,9872 \text{ K}$$

Plošný průřez spalin v 2. části III. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{\text{III}} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \quad (8-53)$$

$$F_{sp} = 1,8 \cdot 3,24 - 18 \cdot 0,038 \cdot -36 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 9,407 \text{ m}^2$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]  
 $n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku III  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku III [m]  
 $l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{\text{skut}} = \frac{O_{sp}^v \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{\text{stř}})}{273} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{9,407} \cdot \frac{(273 + 625,8732)}{273} \quad (8-54)$$

$$w_{sp}^{\text{skut}} = 5,2324 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tab. 8.4: Parametry spalín v 2. části III. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp, PIII}$	0,08260621	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp, PIII}$	0,00010039	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp, PIII}$	0,67483256	-

Tab. 8.5: Rozměry třetího přehříváku

	Značka	Velikost	Jednotka
Vnější průměr trubek	$D_{PIII}$	0,038	m
Tloušťka stěny trubek	$tl_{PIII}$	0,004	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{PIII}$	0,03	m
Počet trubek v řadě	$nt_{PIII}$	36	-
Počet řad	$Z_{PIII}$	16	-
Rozteč mezi řadami	$Z1_{PIII}$	0,09	m
Rozteč mezi řadami	$Z2_{PIII}$	0,06	m
Rozteč mezi trubkami	$R_t_{PIII}$	0,2	m
Počet hadů	$R_h_{PIII}$	2	-

### 8.3.2. Výpočet membránové stěny

#### Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín

Parametry spalín pro střední teplotu spalín v 2. části III. tahu jsou stanoveny lineární interpolací dle [1]. Jsou zaneseny v tabulce 8.4.

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-55)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0826}{0,3602} \cdot \left( \frac{5,2314 \cdot 0,3602}{0,0001003} \right)^{0,8} \cdot 0,6748^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 =$$

$$\alpha_k = 11,8205 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [ $m^2/s$ ]

$Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [-]

$d_e$  ... ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr:

$$d_e = \frac{4 \cdot a \cdot b_{III}}{O} = \frac{4 \cdot 3,6 \cdot 3,24}{129,5057} = 0,3602 \text{ m} \quad (8-56)$$

Kde:  $O$  ... obvod průřezu kanálu

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) \quad (8-57)$$

$$O = 2 \cdot (3,6 + 3,24) + \pi \cdot 36 \cdot 0,038 + 2 \cdot 18 \cdot (3,24 + 0,038) = 129,5057 \text{ m}$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek v jedné řadě  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]  
 $n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku III  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku III [m]  
 $l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

**Součinitel přestupu tepla sáláním membránové stěny**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-58)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2094 \cdot 898,9872^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{744,9522}{898,9872}\right)^4}{1 - \left(\frac{744,9522}{898,9872}\right)}$$

$$\alpha_s = 24,0714 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2373} = 0,2094 \quad (8-59)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (7,1704 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,3276 = 0,2373 \quad (8-60)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbáváme.

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (8-61)$$



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,03244 \cdot 0,3276}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{625,8372 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,1704$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left( \frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left( \frac{4 \cdot 0,2 \cdot 0,06}{\pi \cdot 0,038^2} - 1 \right) = 0,3276 \text{ m} \quad (8-62)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách:

Vstupní a výstupní entalpie spalin byly získány z Tab. 2.3 lineární interpolací pro vstupní a výstupní teplotu spalin.

$$t_z = t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{akt}} \quad (8-63)$$

$$t_z = 273,388 + 0,0034 \cdot \frac{3,512 \cdot (4283,49 - 3669,88)}{36,936} = 471,8022 \text{ °C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 471,8022 + 273,15 = 744,9522 \text{ °C} \quad (8-64)$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení membránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0034$   
 $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [°C]  
 $S_{akt}$  ... celková plocha membránové stěny [m<sup>2</sup>]

Aktivní (otrubkovaná) plocha membránové stěny:

$$S_{akt} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 3,01 \cdot (3,6 + 3,24) = 36,936 \text{ m}^2 \quad (8-65)$$

**Součinitel prostupu tepla membránové stěny**

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 32,3028 = 19,3817 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-66)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity, [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (11,8205 + 24,0714) = 32,3028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-67)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon membránové stěny 2. části III. tahu**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{396,949 - 307,912}{\ln \frac{396,949}{307,912}} = 350,5678 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-68)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1 III}^{skut} - t_{výp} = 670,337 - 273,388 = 396,949 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k2 III} - t_{výp} = 581,3 - 273,388 = 307,912 \text{ } ^\circ\text{C}$$

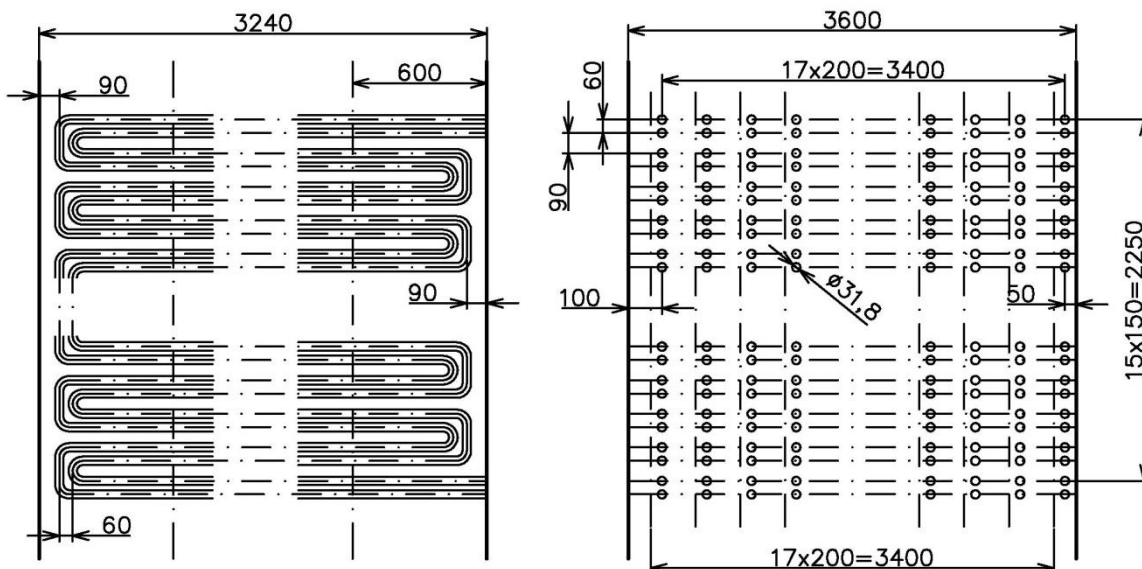
Teplu odebrané spalinám membránovou stěnou v 2. části III. tahu:

$$Q_{ms2 III} = \frac{S_{akt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{36,936 \cdot 19,3817 \cdot 350,5678}{1000} \quad (8-69)$$

$$Q_{ms2 III} = 250,964 \text{ kW}$$

**8.3.3. Výpočet trubkového svazku přehříváku III**

Třetí přehřívák je tvořen hladkými trubkami a koncipován jako dvojitý had z důvodu zajištění dovolené rychlosti proudění páry, která byla stanovena dle [1]. Přehřívák je rovněž navrhnut v souproudeém zapojení z důvodu vysokých teplot spalin na vstupu do prostoru III. přehříváku. Vstupní teplota páry je  $t_{P III}^{in} = 351^\circ\text{C}$  výstupní teplota páry je stanovena zadáním parametrů kotle na  $t_{P III}^{out} = 420^\circ\text{C}$



Obr. 8.4: Rozměry přehříváku III.

Střední teplota páry:

$$t_{P III}^{stř} = \frac{t_{P III}^{out} + t_{P III}^{in}}{2} = \frac{420 + 351}{2} = 385,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-70)$$

$$T_{P III}^{stř} = t_{stř}^p + 273,15 = 385,5 + 273,15 = 658,65 \text{ K}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín**

Parametry spalín stanovené pro střední teplotu spalín jsou uvedené v tab 8.4 a jsou stanoveny lineární interpolací z hodnot dle [1].

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (8-71)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9462 \cdot \frac{0,0826}{0,038} \cdot \left( \frac{5,2314 \cdot 0,038}{0,0001003} \right)^{0,65} \cdot 0,6748^{0,33}$$

$$\alpha_k = 50,2085 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad  
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [-]

Opravný součinitel na uspořádání svazků:

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,5789}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (8-72)$$

$$c_s = 0,9462$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,2}{0,038} = 5,263 \quad (\text{pokud } \sigma_1 > 3, \text{ dosazují } \sigma_1 = 3) \quad (8-73)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,6}{0,038} = 1,5789 \quad (8-74)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry**

Parametry páry jsou stanoveny lineární interpolací pro střední teplotu páry dle [1], hodnoty viz tab. 8.6.

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-75)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0597}{0,03} \cdot \left( \frac{21,8863 \cdot 0,03}{1,2235 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,0568^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

$$\alpha_p = 1796,1939 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]  
 $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-]  
 $w_p$  ... rychlost proudění páry [ $\text{m/s}$ ]

Tab. 8.6: Parametry páry pro přehřívák III

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p, PIII}$	0,05975822	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p, PIII}$	2,441E-05	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p, PIII}$	1,05687268	-
Měrný objem	$V_{p, PIII}$	0,05012457	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p, PIII}$	1,2235E-06	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadu} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 18 \cdot 2 = 0,0254 \text{ m}^2 \quad (8-76)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{11,111 \cdot 0,0501}{0,0254} = 21,8863 \text{ m/s} \quad (8-77)$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním přehříváku III.**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} \quad (8-78)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2094 \cdot 898,9872^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{720,9958}{898,9872}\right)^4}{1 - \left(\frac{720,9958}{898,9872}\right)}$$

$$\alpha_s = 23,1095 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{stř}^{sp}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

Stupeň černosti proudu spalin je vypočítán výše (rovnice 8-60) a je shodný jak u membránové stěny  $\alpha_{\xi} = 0,2094$ .

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

$$t_z = t_{pIII}^{stř} + \left( \varepsilon_{přII} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{přIII}}{S_{přIII}} \cdot 1000 \quad (8-79)$$

$$t_z = 385,524 + \left( 0,006 + \frac{1}{1796,1939} \right) \cdot \frac{2000}{210,4153} \cdot 1000 = 447,8453 \text{ °C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 447,8453 + 273,15 = 720,9958 \text{ °C} \quad (8-80)$$

Kde:  $\varepsilon_{přIII}$  ... součinitel zanesení přehříváku, volím  $\varepsilon_{přII} = 0,006$   
 $t_{pIII}^{stř}$  ... střední teplota média v přehříváku [°C]  
 $S_{přIII}$  ... celková teplosměnná plocha přehříváku [m<sup>2</sup>]  
 $Q_{přIII}$  ... výkon přehříváku [kW]

Plocha trubek III. přehříváku:

$$S_{přIII} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{hadů} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,06 \cdot 18 \cdot 16 \cdot 2 = 210,415 \text{ m}^2 \quad (8-81)$$

**Součinitel prostupu tepla přehříváku III.**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 65,9861}{1 + \frac{65,9861}{1796,1939}} = 38,1887 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-82)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity, [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (50,2085 + 23,1095) = 65,9861 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-83)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon přehříváku III.**Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{284,813 - 161,3}{\ln \frac{284,813}{161,3}} = 231,3973 \text{ °C} \quad (8-84)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1III}^{skut} - t_{pIII}^{in} = 670,337 - 385,524 = 284,813 \text{ °C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k2III} - t_{pIII}^{out} = 581,3 - 420 = 161,3 \text{ °C}$$

Ideální plocha přehříváku III:

$$S_{přIII}^{id} = \frac{Q_{přIII} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{2000 \cdot 1000}{38,1887 \cdot 231,3973} = 226,326 \text{ m}^2 \quad (8-85)$$

Počet řad Přehříváku III:

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{přIII}}^{\text{id}}}{S_{1-\text{řada}}} = \frac{S_{\text{přIII}}^{\text{id}}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{\text{tr}} \cdot n_{\text{hadů}}} \quad (8-86)$$

$$n_{\text{řad}} = \frac{226,326}{\pi \cdot 0,038 \cdot 3,06 \cdot 18 \cdot 2} = 17,20 \rightarrow \text{volím 16 řad}$$

Teplu odebrané spalinám přehřívákem III v 2. části III. tahu:

$$Q_{\text{PIII}} = \frac{S_{\text{přIII}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}}}{1000} = \frac{210,4153 \cdot 38,1887 \cdot 231,393}{1000} \quad (8-87)$$

$$Q_{\text{PIII}} = 1859,394 \text{ kW}$$

### 8.3.4. Výpočet závěsných trubek

Postup stejný jako v předchozí části III. tahu. Zvolíme vstupní teploty páry v daném úseku závěsných trubek a následně je ověříme tepelným výpočtem. Jako výstupní teplota je brána vypočtená skutečná vstupní teplota závěsných trubek v prostoru vratné komory  $t_{\text{zt skut}}^{\text{out}} = 276,002 \text{ }^\circ\text{C}$ . Volená vstupní teplota páry je  $t_{\text{zt}}^{\text{in}} = 276,002 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Střední teplota páry závěsných trubek v 2. části III. tahu:

$$t_{\text{stř}}^{\text{zt}} = \frac{t_{\text{zt skut}}^{\text{out}} + t_{\text{zt}}^{\text{in}}}{2} = \frac{276,002 + 275,002}{2} = 275,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8-88)$$

$$T_{\text{stř}}^{\text{zt}} = t_{\text{stř}}^{\text{zt}} + 273,15 = 275,5 + 273,15 = 548,65 \text{ K} \quad (8-89)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin bude stejný jako u membránové stěny.  $\alpha_k = 11,818349 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry

Parametry páry viz tabulka 8.7. Hodnoty jsou stanoveny pro střední teplotu páry lineární interpolací z hodnot dle [1].

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{\text{zt}}} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_{\text{zt}}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-90)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0554}{0,026} \cdot \left( \frac{18,5723 \cdot 0,026}{6,8561 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,298^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 2596,7727 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]  
 $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]  
 $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $m^2/s$ ]  
 $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-]  
 $d_{zt}$  ... vnitřní průměr [m]  
 $w_p$  ... rychlost proudění páry [m/s]

Tab. 8.7: Parametry páry pro závěsné trubky přehříváku III

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p,zt,PIII}$	0,05548266	$W*m^{-2}*K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p,zt,PIII}$	1,9958E-05	$N*s*m^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p,zt,PIII}$	1,29803738	-
Měrný objem	$V_{p,zt,PIII}$	0,03435301	$m^3/kg$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p,zt,PIII}$	6,8562E-07	$m^2*s^{-1}$

Průtočný průřez pro páru:

Stejný jak v předchozích výpočtech viz rovnice 8-33. Průtočný průřez je  
 $F_p = 0,01911 m^2$ .

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot 0,03435}{0,01911} = 18,5723 m/s \quad (8-91)$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním závěsných trubek

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}}\right)^4} \quad (8-92)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2094 \cdot 548,652^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{564,5876}{548,652}\right)^4}{1 - \left(\frac{564,5876}{548,652}\right)^4}$$

$$\alpha_s = 7,4114 Wm^{-2}K^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalín  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalín [K]

Černost prostředí:

Je stejné jako u membránových stěn je roven  $a_{\zeta} = 0,209443$  vypočtené výše viz rovnice 8-60.

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

Entalpie je stanovena jako funkce tlaku a teplot páry na vstupu a výstupu závěsných trubek z tabulek vodní páry [3].

$$t_z = t_{zt}^{stř} + \left( \varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} \quad (8-93)$$

$$t_z = 275,502 + \left( 0,0035 + \frac{1}{2596,772} \right) \cdot \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot (2798,93 - 2794,33)}{11,6038} \cdot 1000$$

$$t_z = 291,4376 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 291,4376 + 273,15 = 564,5876 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-94)$$

Kde:  $\varepsilon_{zt}$  ... součinitel zanesení závěsných trubek, volím  $\varepsilon_{zt} = 0,0035$   
 $t_{zt}^{stř}$  ... teplota média v závěsných trubkách [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $S_{zt}$  ... plocha závěsných trubek v tahu [ $\text{m}^2$ ]

Plocha závěsných trubek:

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,7 \cdot 36 = 11,6038 \text{ } \text{m}^2 \quad (8-95)$$

Součinitel prostupu tepla závěsných trubek

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 17,3088}{1 + \frac{17,3088}{2596,7727}} = 10,3165 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-96)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (11,8205 + 7,4114) = 17,3088 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-97)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Tepelný výkon závěsných trubek 2. části III. tahu

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{394,335 - 306,298}{\ln \frac{394,335}{306,298}} = 348,4851 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-98)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1 III}^{skut} - t_{zt}^{out} = 670,337 - 276,002 = 394,335 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k2 III} - t_{zt}^{in} = 581,3 - 275,002 = 306,298 \text{ } ^\circ\text{C}$$



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Teplu odebrané spalinám závěsnými trubkami v 2. části III. tahu

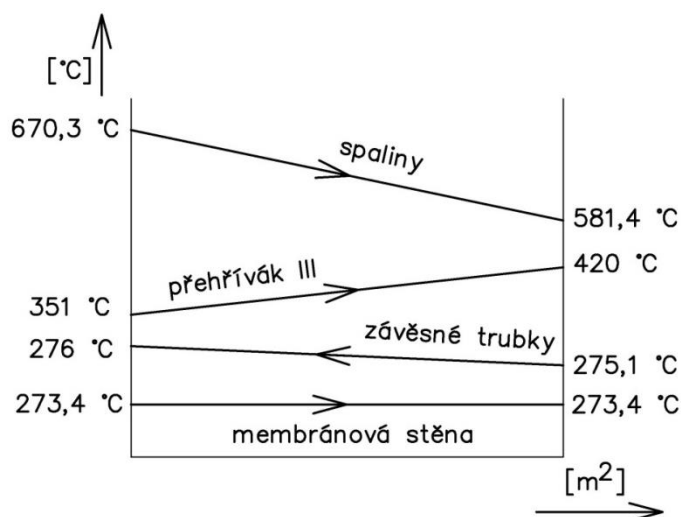
$$Q_{zt2 III} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{11,6038 \cdot 10,3165 \cdot 348,4851}{1000} \quad (8-99)$$

$$Q_{zt2 III} = 41,717 \text{ kW}$$

**Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek**

$$I_{zt2 III}^{in\ skut} = I_{zt2 III}^{out} - \frac{Q_{zt2, \text{č. III. tahu}}}{0,93 \cdot M_{pp}} = 2798,93 - \frac{41,717}{0,93 \cdot 11,111} = 2794,8984 \text{ kJ/kg} \quad (8-100)$$

Teplotu zjistíme z parních tabulek [3] jako funkci entalpie a tlaku. Skutečná teplota na vstupu do závěsných trubek je  $t_{zt2 III}^{in\ skut} = 275,12 \text{ }^\circ\text{C}$  a od zvolené se liší o  $0,118 \text{ }^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

**8.3.5. Přepočítání teploty spalin na výstupu z 2. části III. tahu**

**Obr. 8.5:** Tepelné schéma 2. části III. Tahu

Teplu odebrané spalinám v 2. části III. tahu:

$$Q_{2 III} = Q_{zt2 III} + Q_{ms2 III} + Q_{PIII} \quad (8-101)$$

$$Q_{2 III} = 41,717 + 250,964 + 1859,394 = 2152,076 \text{ kW}$$

Teplu spalin na vstupu do 2. části III. tahu:

$$Q_{sp2 III}^{in} = Q_{sp1 III}^{out} = 15046,938 \text{ kW} \quad (8-102)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Tepló spalín na výstupu z 2. části III. tahu:

$$Q_{sp2\ III}^{out} = Q_{sp2\ III}^{in} - Q_{2\ III} = 15046,938 - 2125,776 = 12894,861\ kW \quad (8-103)$$

Skutečná teplota na výstupu z 2. Části III. tahu:

$$I_{sp2\ III}^{out} = \frac{Q_{sp2\ III}^{out}}{M_{pv}} = \frac{12921,161}{3,512} = 3678,334\ kJ/kg \quad (8-104)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 2. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp2\ III}^{out} = 3678,334\ kJ/kg$  je skutečná teplota  $t_{k2\ III}^{skut} = 581,4813\ ^\circ C$ . Vypočtená teplota se liší od zvolené teploty o  $0,1813\ ^\circ C$ , což je přijatelná odchylka.

## 8.4. Výpočet III. části III. tahu (přehřívák II.)

V prostoru 3. části III. tahu je umístěn trubkový svazek druhého přehříváku. Ten je koncipován jako jednoduchý had s roztečí trubek  $R_{t\text{ PII}} = 100$  mm. Výpočet je stejný jako u třetího přehříváku. Rozměry ploch jsou zobrazeny na Obr. 8.6 a v Tab. 8.8.

Odhadovaná výstupní teplota spalin je  $t_{k3\text{ III}} = 483$  °C. Vstupní teplota spalin je rovna skutečné výstupní teplotě 2. části III. tahu  $t_{k2\text{ III}}^{\text{skut}} = 581,4813$  °C.

### 8.4.1. Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin

Střední teplota spalin v 3. části III. tahu:

$$t_{sp}^{\text{stř}} = \frac{t_{k2\text{ III}}^{\text{skut}} + t_{k3\text{ III}}}{2} = \frac{581,4813 + 483}{2} = 532,2313 \text{ °C} \quad (8-105)$$

$$T_{sp}^{\text{stř}} = t_{sp}^{\text{stř}} + 273,15 = 532,2313 + 273,15 = 805,3813 \text{ K}$$

Plošný průřez spalin v 3. části III. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{\text{III}} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \quad (8-106)$$

$$F_{sp} = 3,6 \cdot 3,24 - 36 \cdot 0,038 \cdot 3,24 - 36 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 7,1908 \text{ m}^2$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]  
 $n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku II  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku II [m]  
 $l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{\text{skut}} = \frac{O_{sp}^v \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{\text{stř}})}{273} = \frac{5,2566 \cdot 3,512}{7,1908} \cdot \frac{(273 + 532,231)}{273} \quad (8-107)$$

$$w_{sp}^{\text{skut}} = 6,1311 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Tab. 8.8:** Rozměry přehříváku II

	Značka	Velikost	Jednotka
Vnější průměr trubek	$D_{\text{PII}}$	0,038	m
Tloušťka stěny trubek	$t_{\text{PII}}$	0,004	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{\text{PII}}$	0,03	m
Počet trubek v řadě	$n_{t\text{ PII}}$	36	-
Počet řad	$Z_{\text{PII}}$	22	-
Rozteč mezi řadami	$Z1_{\text{PII}}$	0,09	m
Rozteč mezi trubkami	$R_{t\text{ PII}}$	0,1	m
Ročet hadů	$R_{h\text{ PIII}}$	1	-

## 8.4.2. Výpočet membránové stěny

**Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín**

Parametry spalín pro střední hodnotu teploty spalín viz tab. 8.9.

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-108)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0735}{0,1198} \cdot \left( \frac{6,1311 \cdot 0,1935}{0,0000829} \right)^{0,8} \cdot 0,6867^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 15,865 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

$d_e$  ... ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr:

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot a \cdot b_{III}}{241,0337} = 0,1935 \text{ m} \quad (8-109)$$

Kde:  $O$  ... obvod průřezu kanálu

Obvod průřezu kanálu:

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) \quad (8-110)$$

$$O = 2 \cdot (3,6 + 3,24) + \pi \cdot 36 \cdot 0,038 + 2 \cdot 36 \cdot (3,06 + 0,038) = 241,0337 \text{ m}$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek v jedné řadě

$D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]

$n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku II

$D$  ... vnější průměr trubek přehříváku II [m]

$l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

**Tab.: 8.9:** Parametry spalín v 3. Části III. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp, PII}$	0,073526	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp, PII}$	8,3E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp, PII}$	0,686777	-

**Součinitel přestupu tepla sáláním membránové stěny**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-111)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1904 \cdot 805,3813^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{759,6985}{805,3813}\right)^4}{1 - \left(\frac{759,6985}{805,3813}\right)}$$

$$\alpha_s = 18,7393 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2133} = 0,1904 \quad (8-112)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

Optická hustota spalin:

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (8,9049 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2133 \quad (8-113)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi zanedbávám dle [1].

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8-114)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,2372}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{532,2313 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 8,9049$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (8-115)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách:

Entalpie jsou stanoveny jako funkce tlaku a vstupní a výstupní teploty z tabulek vodní páry [3].

$$t_z = t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{akt}} \quad (8-116)$$

$$t_z = 273,339 + 0,0034 \cdot \frac{3,512 \cdot (3670,84 - 3011,63)}{36,936} = 486,5485 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 486,5485 + 273,15 = 759,6985 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení membránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0034$   
 $t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [ $^\circ\text{C}$ ];  $t_{výp} = 273,339^\circ\text{C}$   
 $S_{akt}$  ... celková plocha membránové stěny [ $\text{m}^2$ ]

Aktivní otrubkovaná plocha membránové stěny:

$$S_{akt} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 2,7 \cdot (3,6 + 3,24) = 36,936 \text{ } \text{m}^2 \quad (8-117)$$

**Součinitel prostupu tepla membránové stěny**

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 31,1439 = 18,6863 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-118)$$

Kde:  $\psi_e$  – součinitel tepelné efektivnosti [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (15,865 + 18,7393) = 31,1439 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-119)$$

Kde:  $\omega$  – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon membránové stěny 3. Části III. tahu**Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{308,093 - 209,612}{\ln \frac{308,093}{209,612}} = 255,6884 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-120)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2 III}^{skut} - t_{výp} = 581,481 - 273,388 = 308,093 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k3 III} - t_{výp} = 483 - 273,388 = 209,612 \text{ } ^\circ\text{C}$$

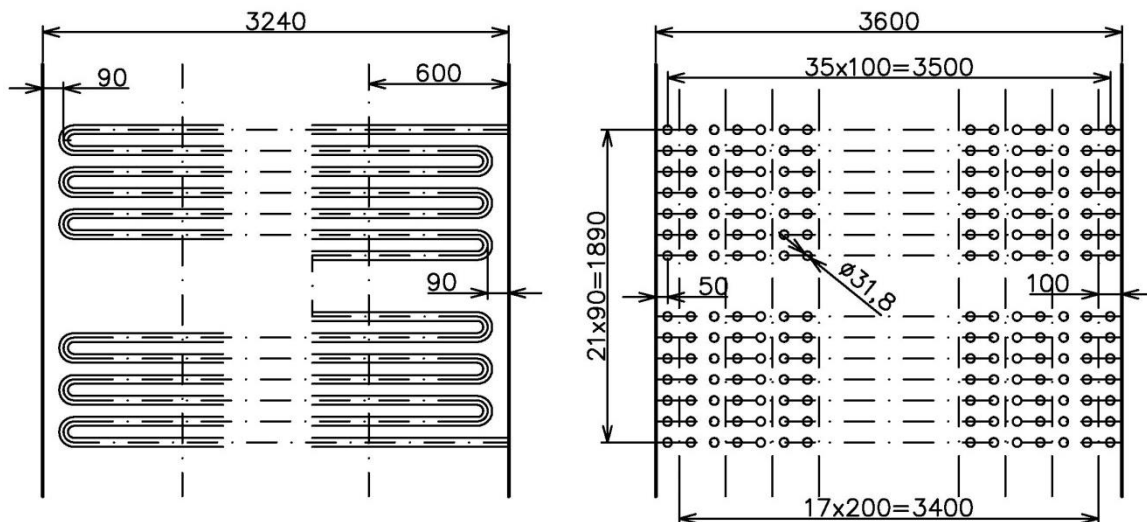
Teplo odebrané spalinám membránovou stěnou v 3. části III. tahu:

$$Q_{ms3 III} = \frac{S_{akt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{36,936 \cdot 18,6863 \cdot 255,6884}{1000} \quad (8-121)$$

$$Q_{ms3 III} = 176,476 \text{ } \text{kW}$$

### 8.4.3. Výpočet přehříváku II.

Přehřívák II. Je v protiproudém zapojení. Jednotlivé rozměry ploch jsou na Obr. 8.6 a v Tab. 8.8. Výpočet je stejný jako u předešlého přehříváku III. Teploty páry stanoveny v kapitole 4.2,  $t_{P II}^{out} = 381,3^{\circ}C$  a  $t_{P II}^{out} = 308,8^{\circ}C$ .



Obr. 8.6: Rozměry přehříváku II.

Střední teplota páry:

$$t_{P II}^{stř} = \frac{t_{P II}^{out} + t_{P II}^{in}}{2} = \frac{381,3 + 308,8}{2} = 345^{\circ}C \quad (8-122)$$

$$T_{P II}^{stř} = t_{P II}^{stř} + 273,15 = 345 + 273,15 = 618,15 K$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Parametry spalin viz tab. 8.9.

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (8-123) \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0735}{0,038} \cdot \left( \frac{6,1311 \cdot 0,038}{0,00008296} \right)^{0,65} \cdot 0,6867^{0,33} \\ &= 59,6091 Wm^{-2}K^{-1} \end{aligned}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad, pro více jak 10 řad  $c_z = 1$   
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $m^2/s$ ]  
 $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [-]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316 \quad (8-124)$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,9}{0,038} = 2,3684 \rightarrow \sigma_2 \geq 2; \text{dle [1] volím } C_S = 1 \quad (8-125)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry**

Parametry páry pro střední teplotu páry viz. Tab. 8.10

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-126)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0565}{0,03} \cdot \left( \frac{18,9344 \cdot 0,03}{1,009 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,1425^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 1822,6094 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1] $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1] $w_p$  ... rychlost proudění páry [ $\text{m/s}$ ]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadû} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 36 \cdot 1 = 0,0254 \text{ m}^2 \quad (8-127)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_p} = \frac{11,111 \cdot 0,0447}{0,0254} = 18,9344 \text{ m/s} \quad (8-128)$$

Tab. 8.10: Parametry páry pro přehřívák II

	značka	velikost	jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p, PII}$	0,056595	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p, PII}$	2,26E-05	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p, PII}$	1,142503	-
Měrný objem	$V_{p, PII}$	0,044705	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p, PII}$	1,01E-06	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



**Součinitel přestupu tepla sáláním přehříváku II.**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{st\check{r}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{st\check{r}}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{st\check{r}}}\right)} \quad (8-129)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1904 \cdot 805,3813^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{669,5167}{805,3813}\right)^4}{1 - \left(\frac{669,5167}{805,3813}\right)}$$

$$\alpha_s = 15,8026 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{st\check{r}}$  ... střední teplota spalin [K]

**Stupeň černosti proudu spalin:**

Je stejné jako u membránových stěn je roven  $a_{\zeta} = 0,1904$  vypočtené výše viz rovnice 8-113.

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:**

$$t_z = t_{p\check{r}II}^{st\check{r}} + \left(\varepsilon_{p\check{r}II} + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{p\check{r}II}}{S_{p\check{r}II}} \cdot 1000 \quad (8-130)$$

$$t_z = 345,0739 + \left(0,006 + \frac{1}{1822,6094}\right) \cdot \frac{2263,33}{289,321} \cdot 1000 = 396,3667 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 396,3667 + 273,15 = 669,5167 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kde:  $\varepsilon_{p\check{r}II}$  ... součinitel zanesení přehříváku, volím  $\varepsilon_{p\check{r}II} = 0,006$   
 $t_{p\check{r}II}^{st\check{r}}$  ... střední teplota média v přehříváku [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $S_{p\check{r}II}$  ... celková teplosměnná plocha přehříváku [ $\text{m}^2$ ]  
 $Q_{p\check{r}II}$  ... výkon přehříváku [ $\text{kW}$ ]

**Plocha trubek přehříváku II.:**

$$S_{p\check{r}II} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} \cdot n_{had\check{u}} \quad (8-131)$$

$$S_{p\check{r}II} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,06 \cdot 36 \cdot 22 \cdot 1 = 289,321 \text{ m}^2$$

**Součinitel prostupu tepla přehříváku II.**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 67,8706}{1 + \frac{67,8706}{1822,6094}} = 39,2603 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-132)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (59,6091 + 15,8026) = 67,8706 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-133)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon Přehříváku II.**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{200,1618 - 174,1716}{\ln \frac{200,1618}{174,1716}} = 186,8557 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-134)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2 \text{ III}}^{\text{skut}} - t_{p \text{ II}}^{\text{out}} = 581,4813 - 381,3195 = 200,1618 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k3 \text{ III}} - t_{p \text{ II}}^{\text{in}} = 483 - 308,8284 = 174,1716 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ideální plocha přehříváku II:

$$S_{p \text{ II}}^{\text{id}} = \frac{Q_{p \text{ II}} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{2263,33 \cdot 1000}{39,2603 \cdot 186,8557} = 308,5228 \text{ m}^2 \quad (8-135)$$

Počet řad přehříváku II:

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{p \text{ II}}^{\text{id}}}{S_{1-\text{řada}}} = \frac{S_{p \text{ II}}^{\text{id}}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{\text{hadů}}} = \frac{308,5228}{\pi \cdot 0,038 \cdot 3,24 \cdot 36 \cdot 1} \quad (8-136)$$

$$n_{\text{řad}} = 22,156 \rightarrow \text{volím 22 řad}$$

Teplu odebrané spalinám přehřívákem II v 3. části III. tahu:

$$Q_{P \text{ II}} = \frac{S_{p \text{ II}} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{289,321 \cdot 39,2603 \cdot 186,8557}{1000} \quad (8-137)$$

$$Q_{P \text{ II}} = 2122,468 \text{ kW}$$

**8.4.4. Výpočet závěsných trubek**

Výpočet jako u předchozích částí. Zvolení vstupní teploty páry v daném úseku závěsných trubek a jejím následné ověření výpočtem. Jako výstupní teplota je brána skutečná vstupní teplota závěsných trubek v prostoru III. přehříváku  $t_{zt \text{ skut}}^{\text{out}} = 275,128 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Odhadovaná vstupní teplota páry je  $t_{zt}^{\text{in}} = 274,128 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Střední teplota páry závěsných trubek v 3. části III. tahu:

$$t_{zt}^{\text{stř}} = \frac{t_{zt \text{ skut}}^{\text{out}} + t_{zt}^{\text{in}}}{2} = \frac{275,128 + 274,128}{2} = 274,628 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-138)$$

$$T_{zt}^{\text{stř}} = t_{zt}^{\text{stř}} + 273,15 = 274,628 + 273,15 = 547,778 \text{ K} \quad (8-139)$$

**Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin**

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin se rovná stejně jako u membránových stěn  $\alpha_k = 15,865 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Výpočet viz. rovnice 8-108.

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry**

Parametry páry pro střední teplotu páry viz tab. 8.11.

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-140)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0554}{0,026} \cdot \left( \frac{18,5723 \cdot 0,026}{6,8561 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,298^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 2596,7727 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-]

$d_{zt}$  ... vnitřní průměr [m]

$w_p$  ... rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,026^2}{4} \cdot 36 = 0,01911 \text{ m}^2 \quad (8-141)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,93 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot 0,0343}{0,01911} = 18,5723 \text{ m/s} \quad (8-142)$$

**Tab. 8.11:** Parametry spalin pro závěsné trubky přehříváku II.

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p,zt PII}$	0,055483	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p,zt PII}$	2E-05	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p,zt PII}$	1,298037	-
Měrný objem	$V_{p,zt PII}$	0,034353	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p,zt PII}$	6,86E-07	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

**Součinitel přestupu tepla sáláním pro závěsné trubky**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-143)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1904 \cdot 547,778^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{563,959}{547,778}\right)^4}{1 - \left(\frac{563,959}{547,778}\right)}$$

$$\alpha_s = 6,7123 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalín  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalín [K]

**Černost prostředí:**

Stejná jako u membránové stěny  $a_{\xi} = 0,1904$  viz rovnice 8-113.

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:**

Entalpie stanoveny pro vstupní a výstupní teplotu pomocí parních tabulek [3].

$$t_z = t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} \quad (8-144)$$

$$t_z = 274,628 + \left(0,0035 + \frac{1}{2596,7727}\right) \cdot \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot (2794,91 - 2790,23)}{11,6037} \cdot 1000$$

$$t_z = 380,8092 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 380,8092 + 273,15 = 563,9592 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kde:  $\varepsilon_{zt}$  ... součinitel zanesení závěsných trubek, volím  $\varepsilon_{zt} = 0,0035$   
 $t_{zt}^{stř}$  ... teplota média v závěsných trubkách [°C]  
 $S_{zt}$  ... plocha závěsných trubek v tahu [m<sup>2</sup>]

**Plocha závěsných trubek:**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,7 \cdot 36 = 11,6037 \text{ m}^2 \quad (8-145)$$

**Součinitel prostupu tepla závěsných trubek**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 20,3196}{1 + \frac{20,3196}{2596,7727}} = 12,0971 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-146)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (15,8650 + 6,7123) = 20,3196 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-147)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon závěsných trubek**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{306,3533 - 208,872}{\ln \frac{306,3533}{208,872}} = 254,4981 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-148)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2 III}^{skut} - t_{zt}^{out} = 581,4813 - 275,128 = 306,3533 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k3 III} - t_{zt}^{in} = 483 - 274,128 = 208,872 \text{ } ^\circ\text{C}$$

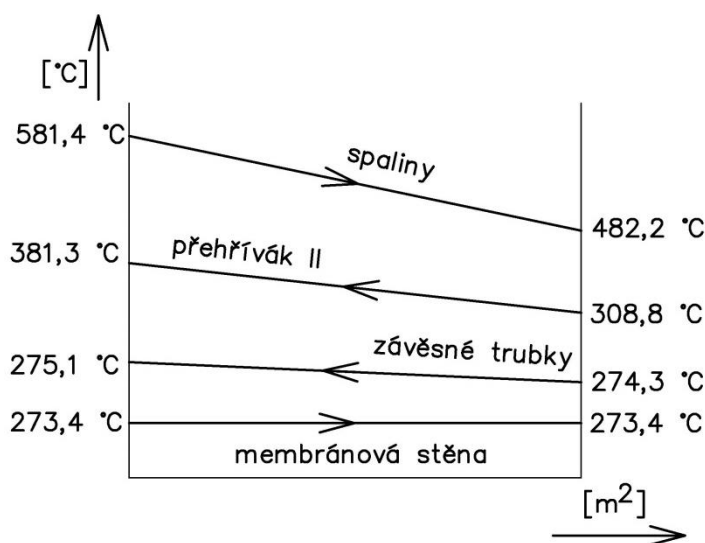
Teplo odebrané spalínám závěsnými trubkami v 3. části III. tahu:

$$Q_{zt3 III} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{11,6037 \cdot 12,0971 \cdot 254,4981}{1000} = 35,724 \text{ kW} \quad (8-159)$$

Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek:

$$I_{zt3 III}^{in skut} = I_{zt3 III}^{in skut} - \frac{Q_{zt3 III}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2794,91 - \frac{35,724}{0,93 \cdot 11,111} = 2791,4563 \text{ kJ/kg} \quad (8-160)$$

Výslednou skutečnou teplotu  $t_{zt3 III}^{in skut} = 274,391 \text{ } ^\circ\text{C}$  získáme z tabulek vodní páry [3] jako funkci entalpie  $I_{zt3 III}^{in skut} = 2791,4563$  a tlaku páry. Skutečná teplota se od návrhové liší o  $0,263 \text{ } ^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.



Obr. 8.7: Tepelné schéma 3. části III. tahu

**8.4.5. Přepoččet teploty spalin na výstupu z 3. části III. tahu**Teplo odebrané spalinám v 3. části III. tahu:

$$Q_{3 III} = Q_{z3 III} + Q_{ms III} + Q_{PII} = 35,721 + 176,476 + 2122,468 \quad (8-151)$$

$$Q_{3 III} = 2334,669 \text{ kW}$$

Teplo spalin na vstupu do 3. části III. tahu:

$$Q_{sp3 III}^{in} = Q_{sp2 III}^{out} = 12894,861 \text{ kW} \quad (8-152)$$

Kde:  $Q_{sp2 III}^{out}$  ... teplo na výstupu z 2. části III. tahu [kW]Teplo spalin na výstupu z 3. části III. tahu:

$$Q_{sp3 III}^{out} = Q_{sp3 III}^{in} - Q_{3 III} = 12894,861 - 2334,669 = 10560,192 \text{ kW} \quad (8-153)$$

Skutečná teplota na výstupu z 3. Části II. Tahu:

$$I_{sp3 III}^{out} = \frac{Q_{sp3 III}^{out}}{M_{pv}} = \frac{10560,192}{3,512} = 3006,2247 \text{ kJ/kg} \quad (8-154)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 3. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp3 III}^{out} = 3006,2247 \text{ kJ/kg}$ . Skutečná teplota  $t_{k3 III}^{skut} = 482,163 \text{ °C}$  se od zvolené liší o  $0,817 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka.

## 8.5. Výpočet IV. části III. tahu

V 4. části III. tahu je umístěn trubkový svazek druhé části I-b přehříváku. První přehřívák musel být rozdělen na dvě části z důvodu jeho velikosti. První část I. přehříváku je umístěna v prostoru IV. tahu. Při výpočtu se bude postupovat stejně jako u předchozích částí a to ve zvolení výstupní teploty na konci části tahu a její ověření tepelným výpočtem.

Rozměry jednotlivých ploch jsou zobrazeny na obr. 8.8 a v tabulce 8.12.

Zvolená výstupní teplota na konci 4. části III. tahu je  $t_{k4 III} = 424,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vstupní teplota do 4. části je stejná se skutečnou výstupní teplotou spalin z 3. části  $t_{k3 III}^{skut} = 482,163\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tab. 8.12:** Rozměry přehříváku I-b

	Značka	Velikost	Jednotka
Vnější průměr trubek	$D_{PIb}$	0,038	m
Tloušťka stěny trubek	$tl_{PIb}$	0,004	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{PIb}$	0,03	m
Počet trubek v řadě	$nt_{PIb}$	36	-
Počet řad	$Z_{PIb}$	20	-
Rozteč mezi řadami	$Z1_{PIb}$	0,09	m
Rozteč mezi trubkami	$R_{tPIb}$	0,1	m
Počet hadů	$R_{hPIb}$	1	-

### 8.5.1. Výpočet střední hodnoty teploty a skutečné rychlosti spalin

Střední teplota spalin v 4. části III. tahu:

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{k3 III}^{skut} + t_{k4 III}}{2} = \frac{482,163 + 424}{2} = 453,4139\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8-155)$$

$$T_{sp}^{stř} = t_{sp}^{stř} + 273,15 = 453,4139 + 273,15 = 726,5639\text{ K}$$

Plošný průřez spalin v 4. části III. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{III} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \quad (8-156)$$

$$F_{sp} = 3,6 \cdot 3,24 - 36 \cdot 0,038 \cdot 3,24 - 36 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 7,1908\text{ m}^2$$

Kde:  $n_{zt}$  ... počet závěsných trubek  
 $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]  
 $n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku I – b  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku I – b [m]  
 $l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} \quad (8-157)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{7,1908} \cdot \frac{(273 + 453,4139)}{273} = 5,531 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

## 8.5.2. Výpočet membránové stěny

### Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin

Parametry spalin jsou stanoveny, pro jejich střední hodnotu teploty, viz tab. 8.13.

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-158)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0599}{0,1198} \cdot \left( \frac{5,1731 \cdot 0,1198}{0,0000629} \right)^{0,8} \cdot 0,6332^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k = 14,9946 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{sp}$  ... Prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [-]

$d_e$  ... ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr:

$$d_e = \frac{4 \cdot a \cdot b_{III}}{O} = \frac{4 \cdot 3,6 \cdot 3,24}{83,437} = 0,1935 \text{ m} \quad (8-159)$$

Obvod průřezu tahu:

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \quad (8-160)$$

$$= 2 \cdot (3,6 + 3,24) + \pi \cdot 36 \cdot 0,038 + 2 \cdot 36 \cdot (3,24 + 0,038) = 241,0337 \text{ m}$$

$n_{zt}$  ... počet závěsných trubek v jedné řadě

Kde:  $D_{zt}$  ... vnější průměr závěsných trubek [m]

$n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku Ib

$D$  ... vnější průměr trubek přehříváku Ib [m]

$l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

**Tab. 8.13: Parametry spalin pro 4. část III. tahu**

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp\text{Plb}}$	0,065974	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp\text{Plb}}$	6,95E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp\text{Plb}}$	0,694659	-



**Součinitel přestupu tepla sáláním pro membránovou stěnu**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}}\right)^4} \quad (8-161)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1975 \cdot 726,5639^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{669,5658}{726,5639}\right)^4}{1 - \left(\frac{669,5658}{726,5639}\right)^4}$$

$$\alpha_s = 13,8074 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  – stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  – stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  – střední teplota spalin [K]

**Stupeň černosti proudu spalin:**

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2222} = 0,1975 \quad (8-162)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (9,2748 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2222 \quad (8-163)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbávám.

**Součinitel zeslabení sálání:**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (8-164)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,2372}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{532,2313 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 9,2748$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy:**

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1\right) = 0,2372 \text{ m} \quad (8-165)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

Vstupní a výstupní entalpii spalin zvolené teploty zjistíme lineární interpolací z Tab. 2.3.

$$t_z = t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{akt}} \quad (8-166)$$

$$t_z = 273,388 + 0,0034 \cdot \frac{3,512 \cdot (3006,22 - 2625,75)}{36,936} = 396,4158 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 396,4158 + 273,15 = 669,5658 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kde:  $\varepsilon_{ms}$  ... součinitel zanesení membránové stěny, volím  $\varepsilon_{ms} = 0,0034$

$t_{výp}$  ... teplota média ve výparníku [ $^\circ\text{C}$ ]

$S_{akt}$  ... celková plocha membránové stěny [ $\text{m}^2$ ]

Aktivní otrubkovaná plocha membránové stěny:

$$S_{akt} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 2,7 \cdot (3,6 + 3,24) = 36,936 \text{ } \text{m}^2 \quad (8-167)$$

**Součinitel prostupu tepla pro membránovou stěnu**

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 26,0898 = 15,6539 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-168)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity, pro slámu volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (15,1812 + 13,8074) = 26,0898 \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-169)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon membránové stěny**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{208,7759 - 150,612}{\ln \frac{208,7759}{150,612}} = 178,4843 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-170)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3 III}^{skut} - t_{výp} = 482,1639 - 273,388 = 208,7759 \text{ } ^\circ\text{C}$$

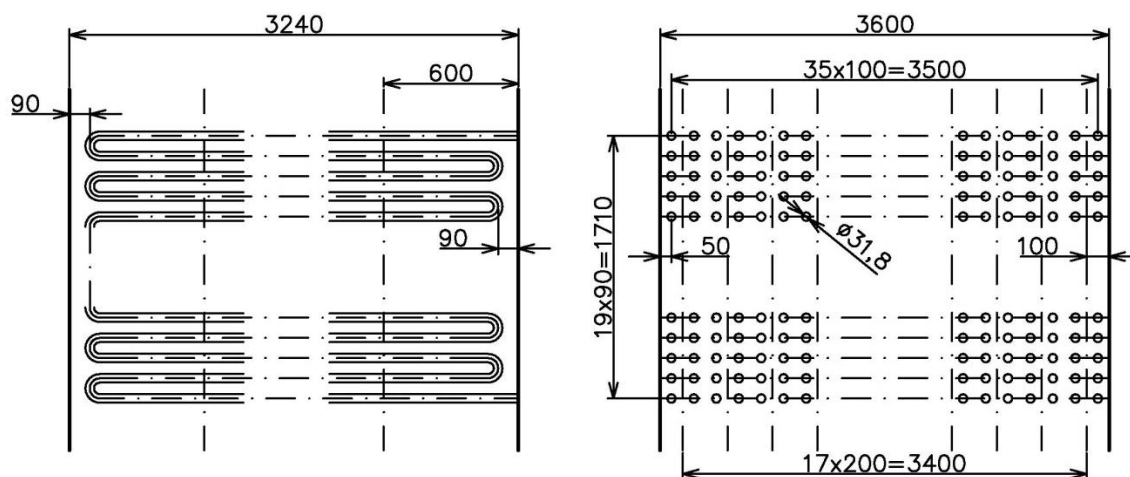
$$\Delta t_2 = t_{k4 III} - t_{výp} = 424 - 273,388 = 150,612 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota odebraná spalinám membránovou stěnou v 4. části III. tahu:

$$Q_{ms4 III} = \frac{S_{akt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{36,936 \cdot 15,6539 \cdot 178,4843}{1000} = 103,198 \text{ } \text{kW} \quad (8-171)$$

### 8.5.3. Výpočet přehříváku I-b

Přehřívák I-b je navržen v protiproudém zapojení a je tvořen hladkými ocelovými trubkami. Postup výpočtu je stejný jako u předchozích teplosměnných ploch. Rozměry jsou zobrazeny na obr. 8.8 a v tabulce 8.12. Teploty páry byly stanoveny vzhledem na rozdělení přehříváku na dvě části následovně  $t_{p\,Ib}^{out} = 243,9^{\circ}\text{C}$  a  $t_{p\,Ib}^{out} = 305^{\circ}\text{C}$ .



Obr.: 8.8: Rozměry přehříváku I-b

Střední teplota páry:

$$t_{p\,Ib}^{stř} = \frac{t_{p\,Ib}^{out} + t_{p\,Ib}^{in}}{2} = \frac{343,9 + 305}{2} = 324,5^{\circ}\text{C} \quad (8-172)$$

$$T_{p\,Ib}^{stř} = t_{p\,Ib}^{stř} + 273,15 = 324,5 + 273,15 = 597,65\text{ K}$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Parametry spalin pro jejich střední teplotu viz tab. 8.13.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (8-173)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0659}{0,038} \cdot \left( \frac{5,531 \cdot 0,038}{0,00006946} \right)^{0,65} \cdot 0,6946^{0,33}$$

$$\alpha_k = 56,3592\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad  
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{1}{0,038} = 2,6316 \quad (8-174)$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,3684 \rightarrow \sigma_2 \geq 2; \text{ dle [1] volím } C_s = 1 \quad (8-175)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry**

Parametry páry jsou určeny pro její střední teplotu a jsou vyneseny v tabulce 8.14.

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8-176)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0561}{0,03} \cdot \left( \frac{16,8033 \cdot 0,03}{0,8861 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,2132^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 1869,1475 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1] $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-] $w_p$  ... rychlost proudění páry [ $\text{m/s}$ ]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadů} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 36 \cdot 1 = 0,0254 \text{ m}^2 \quad (8-177)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{11,111 \cdot 0,0413}{0,0254} = 16,8033 \text{ m/s} \quad (8-178)$$

**Tab. 8.14:** Parametry páry přehřívák I-b

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p, Plb}$	0,056163	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p, Plb}$	2,14E-05	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p, Plb}$	1,213201	-
Měrný objem	$V_{p, Plb}$	0,04138	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p, Plb}$	8,86E-07	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

**Součinitel přestupu tepla sáláním pro přehřívák I-b**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-179)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1974 \cdot 726,5639^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{628,9424}{726,5639}\right)^4}{1 - \left(\frac{628,9424}{726,5639}\right)}$$

$$\alpha_s = 12,6813 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

**Stupeň černota proudu spalin:**

Stejná jak u membránové stěny viz rovnice 8-162. Stupeň černosti proudu spalin je roven  $a_{\zeta} = 0,1974$ .

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:**

$$t_z = t_{přlb}^{stř} + \left(\varepsilon_{přlb} + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{přlb}}{S_{přlb}} \cdot 1000 =$$

$$t_z = 324,4939 + \left(0,006 + \frac{1}{1869,1475}\right) \cdot \frac{1255,5204}{77,3586} \cdot 1000 = 296,8965 \text{ °C} \quad (8-180)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 355,7924 + 273,15 = 628,9424 \text{ °C}$$

Kde:  $\varepsilon_{přlb}$  ... součinitel zanesení přehříváku, volím  $\varepsilon_{přla} = 0,006$   
 $t_{přlb}^{stř}$  ... střední teplota média v přehříváku [°C]  
 $S_{přlb}$  ... celková teplosměnná plocha přehříváku [m<sup>2</sup>]  
 $Q_{přlb}$  ... výkon přehříváku [kW]

**Plocha trubek druhé části přehříváku I-b:**

$$S_{přlb} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{had} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,06 \cdot 36 \cdot 20 \cdot 1$$

$$S_{přlb} = 263,0191 \text{ m}^2 \quad (8-181)$$

**Součinitel prostupu tepla pro přehřívák I-b**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 62,1365}{1 + \frac{62,1365}{1869,1475}} = 36,0824 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-182)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (56,3592 + 12,6813) = 62,1365 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-183)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

### Tepelný výkon přehříváku I-b

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{138,1762 - 119,6}{\ln \frac{138,1762}{119,6}} = 128,6982 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-184)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3 III}^{skut} - t_{přlb}^{out} = 482,1639 - 343,9877 = 138,1762 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k4 III} - t_{přlb}^{in} = 424,6 - 305 = 119,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ideální plocha přehříváku I-b:

$$S_{přlb}^{id} = \frac{Q_{přlb} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{1255,5204 \cdot 1000}{36,0824 \cdot 128,6982} = 270,3681 \text{ m}^2 \quad (8-185)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{přlb}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{přlb}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{hadû}} \quad (8-186)$$

$$n_{řad} = \frac{270,3681}{\pi \cdot 0,038 \cdot 3,06 \cdot 36 \cdot 1} = 20,5588 \rightarrow \text{volím 20 řad}$$

Teplu odebrané spalinám přehřívákem I-b v 4. části III. tahu:

$$Q_{PIb} = \frac{S_{přlb} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{263,01916 \cdot 36,0824 \cdot 128,6982}{1000} = 1221,393 \text{ kW} \quad (8-187)$$

#### 8.5.4. Výpočet závěsných trubek

Postup výpočtu Stejný jako v předchozí části III. tahu. A to odhad vstupní teploty páry v daném úseku závěsných trubek a jejím následným ověřením výpočtem. Jako výstupní teplota je brána skutečná vstupní teplota závěsných trubek v prostoru III. přehříváku  $t_{zt3 III}^{in skut} = 274,39 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Odhadovaná vstupní teplota páry do závěsných trubek je  $t_{zt4 III}^{in} = 273,3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Sřední teplota páry závěsných trubek v 3. části III. tahu:

$$t_{zt}^{stř} = \frac{t_{zt3 III}^{out skut} + t_{zt4 III}^{in}}{2} = \frac{274,39 + 273,3}{2} = 273,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-188)$$

$$T_{zt}^{stř} = t_{zt}^{stř} + 273,15 = 273,8 + 273,15 = 54546,95 \text{ K} \quad (8-189)$$

### Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín se rovná stejně jako u membránových stěn  $\alpha_k = 15,1812 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Výpočet viz. rovnice 8-158.

### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0554}{0,026} \cdot \left( \frac{18,5723 \cdot 0,026}{6,856 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,298^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1868,2889 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (8-190)$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [-]

$d_{zt}$  ... vnitřní průměr [m]

$w_p$  ... rychlost proudění páry [m/s]

Tab. 8.15: Parametry páry pro závěsné trubky přehříváku I-b

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p,zt,Plb}$	0,055483	$\text{W}^*\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p,zt,Plb}$	2E-05	$\text{N}^*\text{s}^*\text{m}^{-2}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p,zt,Plb}$	1,298037	-
Měrný objem	$V_{p,zt,Plb}$	0,034353	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p,zt,Plb}$	6,86E-07	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,026^2}{4} \cdot 36 = 0,01911 \text{ m}^2 \quad (8-191)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,93 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot 0,0343}{0,01911} = 18,5723 \text{ m/s} \quad (8-192)$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním pro závěsné trubky**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (8-193)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1974 \cdot 546,95^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{572,590}{546,95}\right)^4}{1 - \left(\frac{572,590}{546,95}\right)}$$

$$\alpha_s = 7,1132 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

**Stupeň černosti proudu spalin:**

Stejná jak u membránové stěny viz rovnice 8-162. Stupeň černosti proudu spalin je roven  $a_{\xi} = 0,1974$ .

**Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách:**

Entalpie jsou stanoveny jako funkce zvolených teplot a tlaku z parních tabulek [3]

$$t_z = t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{0,93 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}}$$

$$t_z = 273,891 + \left(0,0035 + \frac{1}{2596,77}\right) \cdot \frac{0,93 \cdot 11,111 \cdot (2791,47 - 2786,73)}{7,349} \cdot 1000 \quad (8-194)$$

$$t_z = 299,4404 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 299,4404 + 273,15 = 572,5904 \text{ K}$$

Kde:  $\varepsilon_{zt}$  ... součinitel zanesení závěsných trubek, volím  $\varepsilon_{zt} = 0,0035$   
 $t_{zt}^{stř}$  ... teplota média v závěsných trubkách [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $S_{zt}$  ... plocha závěsných trubek v tahu [ $\text{m}^2$ ]

**Plocha závěsných trubek:**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,7 \cdot 36 = 7,349 \text{ m}^2 \quad (8-195)$$

**Součinitel prostupu tepla pro závěsné trubky**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 20,0649}{1 + \frac{20,0649}{2596,7727}} = 11,9466 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-196)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (15,8650 + 6,7123) = 20,3196 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8-197)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

**Tepelný výkon závěsných trubek**

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{208,7729 - 150,609}{\ln \frac{208,7729}{150,609}} = 178,0311 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8-198)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3 III}^{skut} - t_{zt}^{out} = 482,1639 - 274,391 = 208,7729 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k4 III} - t_{zt}^{in} = 424 - 273,391 = 150,609 \text{ } ^\circ\text{C}$$

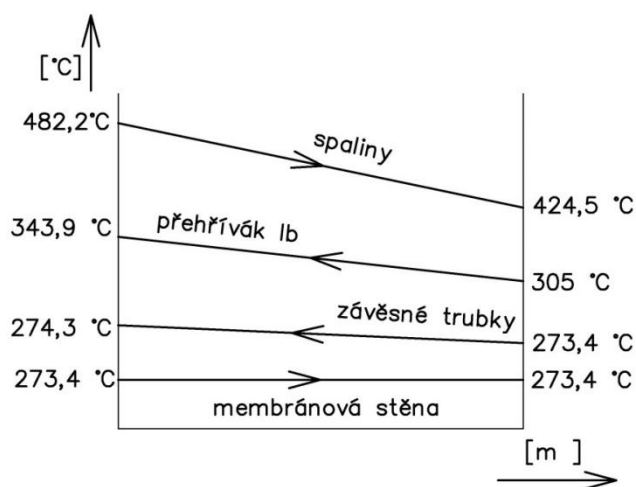
Teplu odebrané spalinám závěsnými trubkami v 4. části III. tahu

$$Q_{zt4 III} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{7,349 \cdot 11,9466 \cdot 178,0311}{1000} = 15,630 \text{ kW} \quad (8-199)$$

**Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek**

$$I_{zt4 III}^{in skut} = I_{zt3 III}^{in skut} - \frac{Q_{zt4 III}}{0,93 \cdot M_{pp}} = 2791,47 - \frac{15,630}{0,93 \cdot 11,111} = 2789,9623 \text{ kJ/kg} \quad (8-200)$$

Pro vypočtenou vstupní entalpii  $I_{zt4 III}^{in skut} = 2789,9623 \text{ kJ/kg}$  získáme z parních tabulek [3] skutečnou výstupní teplotu  $t_{zt4 III}^{in skut} = 274,0742 \text{ } ^\circ\text{C}$  jako funkci tlaku a entalpie. Vypočtená skutečná vstupní teplota se od odhadnuté liší  $0,6842 \text{ } ^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

**8.5.5. Přepočet teploty spalin na výstupu ze 4. části III. tahu**

**Obr. 8.9:** Tepelné schéma 4. části III. tahu

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Teplo odebrané spalinám v 4. části III. tahu:

$$Q_{4 III} = Q_{z4 III} + Q_{ms4 III} + Q_{PIb} \quad (8-201)$$

$$Q_{4 III} = 15,630 + 103,198 + 1221,393 = 1340,222 \text{ kW}$$

Teplo spalin na vstupu do 4. části III. tahu:

$$Q_{sp4 III}^{in} = Q_{sp3 III}^{out} = 10560,192 \text{ kW} \quad (8-202)$$

Kde:  $Q_{sp3 III}^{out}$  ... teplo spalin na výstupu z 3. části III. tahu [kJ/kg]Teplo spalin na výstupu ze 4. části III. tahu:

$$Q_{sp4 III}^{out} = Q_{sp4 III}^{in} - Q_{4 III} = 10560,192 - 1340,222 = 9219,969 \text{ kW} \quad (8-203)$$

**Skutečná teplota spalin na výstupu z 4. části III. tahu**

$$I_{sp4 III}^{out} = \frac{Q_{sp4 III}^{out}}{M_{pv}} = \frac{9219,969}{3,512} = 2624,6967 \text{ kJ/kg} \quad (8-204)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 4. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp4 III}^{out} = 2624,6967 \text{ kJ/kg}$ . Skutečná teplota spalin na výstupu z III. tahu je  $t_{k4 III}^{skut} = 424,504 \text{ °C}$ . Od odhadované teploty se liší o 0,196 °C, což je přijatelná odchylka.

## 9. Výpočet IV

Teplota spalin vstupující do IV. tahu je již nižší proto IV. a V. tah netvoří membránová stěna výparníku, ale jsou tvořeny plechovou šachtou, v té jsou umístěny jednotlivé svazky výhřevných ploch. V prostoru IV. tahu jsou umístěny svazky první části I. přehříváku, druhého ohříváku vzduchu a ekonomizéru. Mezi jednotlivými svazky je mezera  $h = 0,8$  m pro servisní průlezy a parní ofukovače.

Délku IV. tahu určím z rychlosti spalin v místě, kde bude dosahovat nejvyšších hodnot. Tím místem je druhý ohřívák vzduch. Zvolená rychlost spalin dle rady konzultanta je:  $w_{sp} = 6,5$  m/s. Předpokládaná střední teplota spalin na OV2 je  $330$  °C. Délka V. tahu bude shodná s délkou IV. tahu.

### 9.1. Návrh rozměru IV. a V. tahu

Plošný průřez spalin:

$$F_{sp} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{OV2})}{273} = \frac{4,256 \cdot 3,512}{6,5} \cdot \frac{(273 + 330)}{273} \quad (9-1)$$

$$F_{sp} = 5,0796 \text{ m}^2$$

Kde:  $t_{sp}^{OV2}$  ... střední teplota v OV2  
 $w_{sp}$  ... rychlost spalin zvolená do OV2

Délka  $b_{IV-V}$ :

$$b_{IV-V} = \frac{F_{sp}}{a - n_{tr} \cdot D} = \frac{5,0796}{3,6 - 45 \cdot 0,0445} = 3,1797 \rightarrow 3,2 \text{ m} \quad (9-2)$$

Kde:  $n_{tr}$  – počet trubek OV2 v jedné řadě  
 $D$  – vnější průměr trubek OV2 [m]

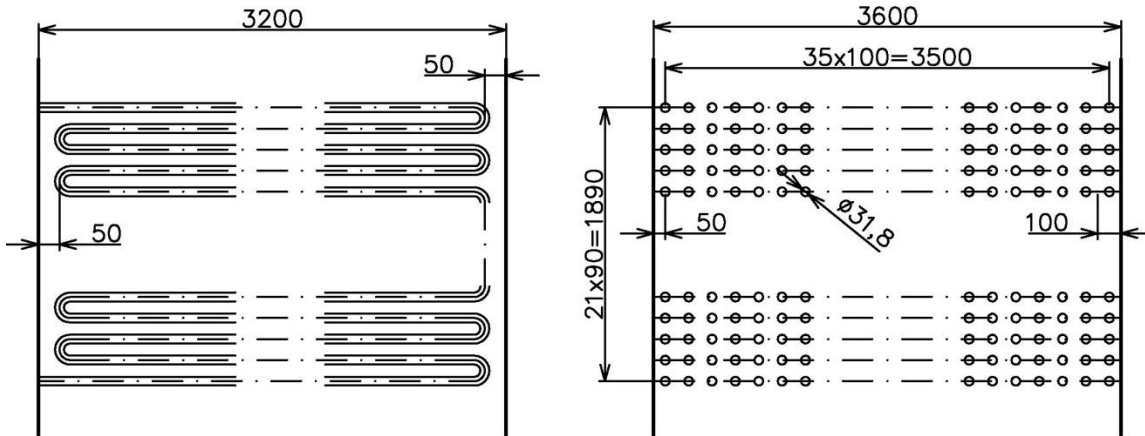
### 9.2. Výpočet přehříváku I-a

Přehřívák I-a je tvořen hladkými ocelovými trubkami a je navržen v protiproudém zapojení. Vstupní teplota spalin se rovná výstupní teplotě z koncové 4. části třetího tahu  $t_{k4 III}^{skut} = 424,504$  °C. Postup výpočet je stejný jako pro svazky v III. tahu s tím rozdílem že už nepočítáme teplo odevzdané membránové stěně a závěsným trubkám. Rozměry viz Obr 9.1 a Tab. 9.1.

**Tab. 9.1:** Rozměry přehříváku I-a

	značka	velikost	jednotka
Vnější průměr trubek	$D_{Pia}$	0,038	m
Tloušťka stěny trubek	$tl_{Pia}$	0,004	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{Pia}$	0,03	m
Počet trubek v řadě	$nt_{Pia}$	36	-
Počet řad	$Z_{Pia}$	22	-
Rozteč mezi řadami	$Z1_{Pia}$	0,09	m
Rozteč mezi trubkami	$R_t_{Pia}$	0,1	m
Počet hadů	$R_h_{Pia}$	1	-

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene



Obr. 9.1: Rozměry přehříváku I-a

Střední teplota spalin:

Teplotu na konci 1. části IV. tahu volím  $t_{k1 IV} = 377 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{k4 III}^{skut} + t_{k1 IV}}{2} = \frac{424,5 + 377}{2} = 400,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9-3)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 400,7 + 273,15 = 673,9 \text{ K}$$

Plošný průřez spalin v 1. části IV. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e \quad (9-4)$$

$$F_{sp} = 3,6 \cdot 3,2 - 36 \cdot 0,038 \cdot 3,1 = 7,2792 \text{ m}^2$$

Kde:  $n_{tr}$  ... počet trubek v řadě přehříváku I – a  
 $D$  ... vnější průměr trubek přehříváku I – a [m]  
 $l_e$  ... délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{stř})}{273} \quad (9-5)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,2566 \cdot 3,512}{7,2792} \cdot \frac{(273 + 400,7)}{273} = 5,679 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**9.2.1. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**

Parametry stanovené pro střední teplotu spalin viz Tab. 9.2

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (9-6)$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0609}{0,038} \cdot \left( \frac{5,068 \cdot 0,038}{0,000060823} \right)^{0,65} \cdot 0,6999^{0,33}$$

$$\alpha_k = 53,7766 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad, pro více jak 10 řad  $c_z = 1$  [1]  
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_{sp}$  – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [–]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{1}{0,038} = 2,6316 \quad (9-7)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,3684 \rightarrow \sigma_2 \geq 2; \text{ dle [1] volím } C_S = 1 \quad (9-8)$$

**Tab. 9.2:** parametry pro spalín 1. části IV. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{Sp\,Pia}$	0,060972	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{Sp\,Pia}$	6,08E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{Sp\,Pia}$	0,699925	-

### 9.2.2. Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry

Parametry stanovené pro střední hodnotu teploty páry viz Tab. 9.3

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9-9)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0554}{0,03} \cdot \left( \frac{14,958 \cdot 0,03}{0,7361 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,2935^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_p = 1999,119 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]  
 $\lambda_p$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_p$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu páry [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_p$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [–]  
 $w_p$  ... rychlost proudění páry [ $\text{m/s}$ ]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadů} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 36 \cdot 1 = 0,0254 \text{ m}^2 \quad (9-10)$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_p} = \frac{11,111 \cdot 0,0368}{0,0254} = 14,9582 \text{ m/s} \quad (9-11)$$

Střední teplota páry:

Teploty stanoveny na základě tepelné bilance viz Tab. 4.2 s ohledem na rozdělení přehříváku.

$$t_{přia}^{stř} = \frac{t_{přia}^{out} + t_{přia}^{in}}{2} = \frac{305 + 276}{2} = 290,5 \text{ °C} \quad (9-12)$$

Tab. 9.3: Parametry páry pro přehřívák I-a

	značka	velikost	jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{p, Pla}$	0,055399	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta_{p, Pla}$	2E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{p, Pla}$	1,293569	-
Měrný objem	$V_{p, Pla}$	0,036836	$\text{m}^3/\text{kg}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{p, Pla}$	7,36E-07	

## 9.2.3. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (9-13)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,22607 \cdot 673,904^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{576,6367}{673,904}\right)^4}{1 - \left(\frac{576,6367}{673,904}\right)}$$

$$\alpha_s = 11,4088 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2588} = 0,226067 \quad (9-14)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,804 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2588 \quad (9-15)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

$r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]

$s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání částicemi popílku dle [1] neuvažujeme.

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (9-16)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,2372}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{400,7542 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 10,804015$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů

$p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (9-17)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

$$t_z = t_{př1a}^{stř} + \left( \varepsilon_{př1a} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{př1a}}{S_{př1a}} \cdot 1000 \quad (9-18)$$

$$t_z = 290,5 + \left( 0,003 + \frac{1}{1999,119} \right) \cdot \frac{1087,2979}{293,103} \cdot 1000 = 303,4867 \text{ °C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 303,4867 + 273,15 = 576,6367 \text{ °C}$$

Kde:  $\varepsilon_{př1a}$  ... součinitel zanesení přehříváku, volím  $\varepsilon_{př1a} = 0,003$

$t_{př1a}^{stř}$  ... střední teplota média v přehříváku [°C]

$S_{př1a}$  ... celková teplosměnná plocha přehříváku [m<sup>2</sup>]

$Q_{př1a}$  ... výkon přehříváku [kW]

Plocha trubek první části přehříváku I:

$$S_{př1a} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{hadů} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,1 \cdot 36 \cdot 22 \cdot 1 = 293,103 \text{ m}^2 \quad (9-19)$$

**9.2.4. Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 58,6669}{1 + \frac{58,6669}{1999,119}} = 34,1966 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-20)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (53,7767 + 11,4088) = 58,6669 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-21)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

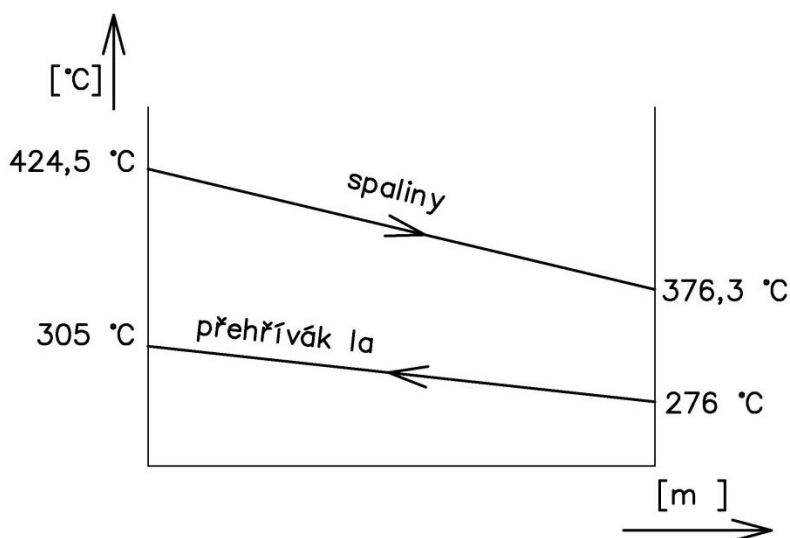
## 9.2.5. Tepelný výkon přehříváku I-a

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{119,5042 - 101,002}{\ln \frac{119,5042}{101,002}} = 109,9939 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-22)$$

$$\Delta t_1 = t_{k4 III}^{skut} - t_{přIa}^{out} = 424,5042 - 305 = 119,5042 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k1 IV} - t_{přIa}^{in} = 377,0042 - 276,0022 = 101,002 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr.: 9.2: Tepelné schéma 1. části IV. tahu

Ideální plocha přehříváku I-a:

$$S_{přIa}^{id} = \frac{Q_{přIa} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{1087,3979 \cdot 1000}{34,1966 \cdot 109,9939} = 289,0923 \text{ m}^2 \quad (9-23)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{přIa}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{přIa}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{hadů}} \quad (9-24)$$

$$n_{řad} = \frac{289,0923}{\pi \cdot 0,038 \cdot 3,1 \cdot 36 \cdot 1} = 21,6989 \rightarrow \text{volím 22 řad}$$



**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Teplu odebrané spalinám přehřívákem I-a:

$$Q_{PIa} = \frac{S_{přIa} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{293,103 \cdot 34,1966 \cdot 109,9939}{1000} = 1102,483 \text{ kW} \quad (9-25)$$

Teplu na vstupu do 1.části IV. tahu

$$Q_{sp1 IV}^{in} = Q_{sp4 III}^{out} = 9219,969 \text{ kW} \quad (9-26)$$

Teplu na výstupu z 1.části IV. tahu:

$$Q_{sp1 IV}^{out} = Q_{sp1 IV}^{in} - Q_{PIa} = 9219,969 - 1102,483 = 8117,485 \text{ kW} \quad (9-27)$$

**9.2.6. Skutečná teplota spalin na konci 1. části IV. tahu**

$$I_{sp1 IV}^{out} = \frac{Q_{sp1 IV}^{out}}{M_{pv}} = \frac{8117,485}{3,512} = 2310,8469 \text{ kJ/kg} \quad (9-28)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 1. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp1 IV}^{out} = 2310,8469 \text{ kJ/kg}$ . Skutečná teplota spalin na výstupu z první části IV. tahu je  $t_{k1 IV}^{skut} = 376,334 \text{ °C}$ . Ta se od zvolené teploty liší o  $0,665 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka.

**9.3. Výpočet ohříváku vzduchu OV2**

Rozměry ohříváku vzduchu OV2 jsou na Obr. 9.4 a v tabulce 9.4. Nejprve si zvolíme množství recirkulace vzduchu a jeho teploty v jednotlivých částech viz Obr. 9.3, na kterém je schématické zobrazení zapojení ohříváků vzduchu a recirkulace. Postup tepelného výpočtu je stejný jak u předchozích výhřevných ploch.

Zvolená teplota spalin na výstupu  $t_{k2 IV} = 281,3 \text{ °C}$ . Teplota spalin na vstupu této části IV. tahu je shodná se skutečnou teplotou na výstupu z části předešlé  $t_{k1 IV}^{skut} = 376,334 \text{ °C}$ .

**Tab. 9.4:** Rozměry ohříváku vzduchu OV2

	Značka	Velikost	Jednotka
Počet trubek v jedné řadě	$n_{toh}$	45	-
Vnější průměr trubek	$D_{oh}$	0,0445	m
Tloušťka stěn trubek	$TI_{oh}$	0,0032	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{oh}$	0,0381	m
Počet řad	$Z_{oh}$	22	-
Rozteč trubek	$Z1_{oh}$	0,08	m
Rozteč trubek	$Z2_{oh}$	0,08	m
Efektivní délka trubek	$le_{oh}$	3,2	m
Počet pater	$n_{pat}$	1	-

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Střední teplota spalin v 2. části IV. tahu:

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{k1IV}^{skut} + t_{k2IV}}{2} = \frac{376,334 + 281,3}{2} = 328,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-29)$$

$$T_{sp}^{stř} = t_{sp}^{stř} + 273,15 = 328,8 + 273,15 = 601,95 \text{ K}$$

Plošný průřez spalin v 2. části IV. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 3,6 \cdot 3,2 - 45 \cdot 0,0445 \cdot 3,2 = 5,112 \text{ m}^2 \quad (9-30)$$

Kde:  $n_{tr}$  ... počet trubek OV2 v jedné řadě  
 $D$  ... vnější průměr trubek OV2 [m]

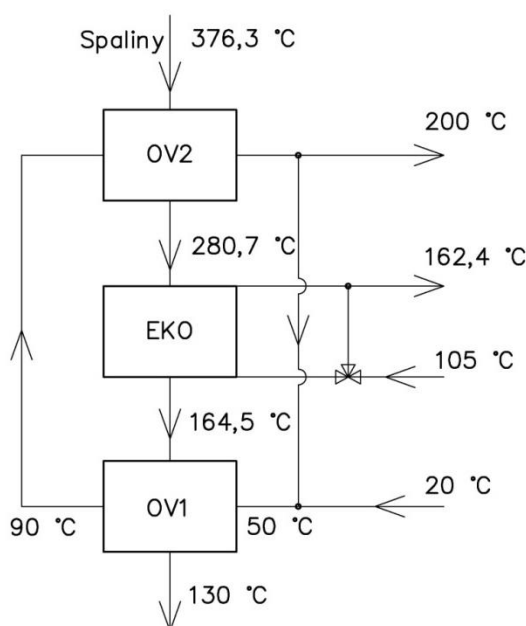
Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{stř})}{273} \quad (9-31)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,256 \cdot 3,512}{1,82} \cdot \frac{(273 + 328,834)}{273} = 6,4463 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 9.3.1. Bilance ohřívání vzduchu

Spalovací vzduch je rozdělen na primární a sekundární v poměru 50:50 o teplotě 200 °C. Iteračním výpočtem jsem stanovil, že v prvním ohříváku OV1 bude vzduch ohřát z teploty 50 °C na teplotu 90 °C. V Druhém ohříváku pak z 90 °C na požadovanou teplotu 200 °C.



**Obr. 9.3:** Schéma zapojení a bilance ohřívání vzduchu

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Množství primárního a sekundárního vzduchu:

Vzduch je rozdělen v poměru 50:50 %.

$$M_1 = 0,5 \cdot M_{vzskut}^v = 0,5 \cdot 3,4322 = 1,7161 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (9-32)$$

$$M_2 = 0,5 \cdot M_{vzskut}^v = 0,5 \cdot 3,4322 = 1,7161 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Kde:  $M_{vzskut}^v$  ... skutečné množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva [ $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ]

Množství recirkulovaného vzduchu:

Bilanční rovnice množství recirkulace dle rad konzultant. Stanoví se z množství vzduchu a teplot.

$$M_{vzskut}^v \cdot 20 + M_{rec} \cdot 200 = (M_{vzskut}^v + M_{rec}) \cdot 50 \quad (9-33)$$

$$M_{rec} = M_{vzskut}^v \cdot \frac{50 - 20}{200 - 50} = 3,4322 \cdot \frac{50 - 20}{200 - 50} = 0,6864 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Množství recirkulovaného vzduchu bylo stanoveno na 20 %.

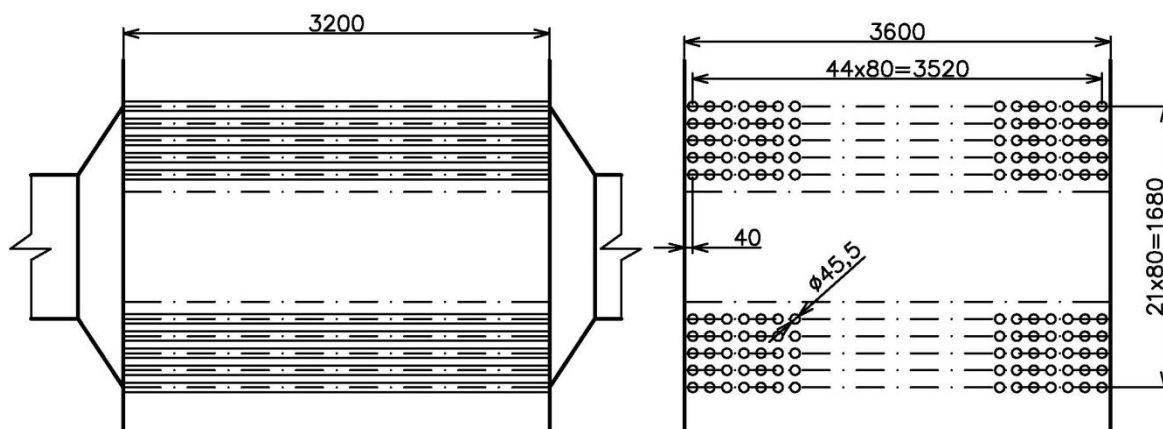
Celkové množství vzduchu v ohřívácích:

Je množství spalovacího vzduchu zvětšené o množství vzduchu recirkulovaného. Toto množství vzduchu prochází ohříváky.

$$M_{celk} = M_{vzskut}^v + M_{rec} = 3,4322 + 0,6864 = 4,1186 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (9-34)$$

**9.3.2. Parametry ohříváku vzduchu OV2**

Ohřívák vzduchu OV2 je koncipován jako jeden velký svazek trubek, který vede napříč celým spalínovým kanálem. Jeho parametry jsou v Tab. 9.4 a na Obr.9.4.



**Obr. 9.4:** Rozměry ohříváku vzduchu OV2

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Střední teplota vzduchu:

$$t_{vz}^{stř} = \frac{t_{OV2}^{out} + t_{OV2}^{in}}{2} = \frac{200 + 90}{2} = 145 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-35)$$

Kde:  $t_{OV2}^{out}$  ... teplota ohřátého vzduchu vystupující z OV2  
 $t_{OV2}^{in}$  ... teplota ohřátého vzduchu vystupující z OV1

### 9.3.3. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Parametry spalin stanovené pro jejich střední hodnotu teploty viz Tab. 9.5.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (9-36)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9987 \cdot \frac{0,0539}{0,0445} \cdot \left( \frac{6,4463 \cdot 0,0445}{0,00004995} \right)^{0,65} \cdot 0,7071^{0,33}$$

$$\alpha_k = 60,0139 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad; pro více jak 10. řad  $c_z = 1$   
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (9-37)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot 1,7977 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,7977}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,998769$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (9-38)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (9-39)$$

**Tab. 9.5:** Parametry spalin pro 2. část IV. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{sp,OV2}$	0,053997	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{sp,OV2}$	5E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prantlovo číslo	$Pr_{sp,OV2}$	0,707117	-

### 9.3.4. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (9-40)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1755 \cdot 601,9842^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{510,0671}{601,9842}\right)^4}{1 - \left(\frac{510,0671}{601,9842}\right)}$$

$$\alpha_s = 6,2338 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1948} = 0,1755 \quad (9-41)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (15,4709 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,1247 = 0,1948 \quad (9-42)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sáláním popílkovými částicemi dle [1] zanedbávám.

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (9-43)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,03244 \cdot 0,1247}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{328,8342 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 15,4709$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,09 \cdot 0,0445 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,0445^2} - 1\right) = 0,1247 \text{ m} \quad (9-44)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách:

$$t_z = \frac{t_{sp}^{stř} + t_{vz}^{stř}}{2} = \frac{328,83 + 145}{2} = 236,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-45)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 236,91 + 273,15 = 510,06 \text{ K}$$

### 9.3.5. Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu:

Parametry vzduchu jsou stanoveny pro jeho střední hodnotu teploty dle [1], jsou v tabulce 9.6.

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{vz}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vz} \cdot d}{\nu_{vz}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{vz}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9-46)$$

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0353}{0,0381} \cdot \left( \frac{19,6227 \cdot 0,0381}{2,831 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,71^{0,4} \cdot 0,9054 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_{vz} = 58,0524 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_{vz}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu vzduchu [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]

$\nu_{vz}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu vzduchu [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{vz}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu vzduchu [-]

$d$  ... vnitřní průměr [m]

$w_{vz}$  ... rychlost proudění vzduchu [m/s]

Průtočný průřez pro vzduch:

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} = \frac{\pi \cdot 0,0381^2}{4} \cdot 45 \cdot 22 = 1,1287 \text{ m}^2 \quad (9-47)$$

Rychlost proudění vzduchu:

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot M_{celk}}{F_{vz}} \cdot \left( 1 + \frac{t_{vz}^{stř}}{273} \right) = \frac{3,512 \cdot 4,1186}{1,1287} \cdot \left( 1 + \frac{145}{273} \right) = 19,6227 \text{ m/s} \quad (9-48)$$

**Tab. 9.6:** Parametry vzduchu pro ohřívák vzduchu OV2

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{v,OV2}$	0,03534	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{v,OV2}$	2,83E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{v,OV2}$	0,71	-

### 9.3.6. Součinitel prostupu tepla ohříváku vzduchu OV2

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{vz} \cdot \alpha_{sp}}{\alpha_{vz} + \alpha_{sp}} = 0,85 \cdot \frac{58,0524 \cdot 66,2478}{58,0524 + 66,2478} = 26,2989 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-49)$$

Kde:  $\xi$  ... součinitel využití plochy, volím  $\xi = 0,85$  [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (60,0139 + 6,2339) = 66,2478 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-50)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

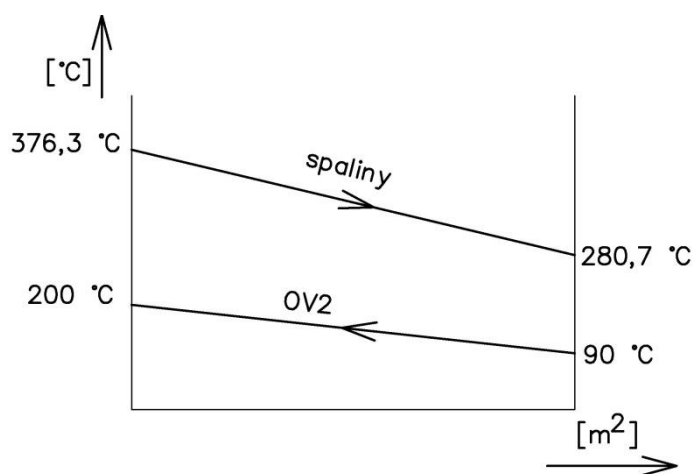
### 9.3.7. Tepelný výkon ohříváku vzduchu OV2

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{191,3342 - 176,3342}{\ln \frac{191,3342}{176,3342}} = 183,7322 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-51)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1 IV} - t_{OV2}^{in} = 281,3342 - 90 = 191,3342 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k2 IV}^{skut} - t_{OV2}^{out} = 376,3342 - 200 = 176,3342 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr. 9.5: Tepelné schéma 2. části IV. tahu

Výkon ohříváku vzduchu OV2:

$$Q_{OV2} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot (1 + 0,2) \cdot (I_{out} - I_{in}) \quad (9-52)$$

$$Q_{OV2} = 3,512 \cdot 1,4 \cdot (1 + 0,2) \cdot (653,311 - 292,36)$$

$$Q_{OV2} = 2130,13823 \text{ kW}$$

Kde:  $I_{out}$  ... je entalpi vzduchu na výstupu z OV2 z Tab. 2.3  
 $I_{in}$  ... je entalpi vzduchu na výstupu z OV2 z Tab. 2.3

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Plocha ohříváku vzduchu OV2:

$$S_{OV2} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{blokù} \quad (9-53)$$

$$S_{OV2} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 3,2 \cdot 45 \cdot 22 \cdot 1 = 442,8892 \text{ m}^2$$

Ideální plocha ohříváku vzduchu OV2:

$$S_{OV2}^{id} = \frac{Q_{OV2} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{2130,1832 \cdot 1000}{26,2989 \cdot 183,7322} = 440,8426 \text{ m}^2 \quad (9-54)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{OV2}^{id}}{s_{1-řada}} = \frac{S_{OV2}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr}} \quad (9-55)$$

$$n_{řad} = \frac{440,8426}{\pi \cdot 0,0445 \cdot 3,2 \cdot 45} = 21,8983 \rightarrow \text{volím 22 řad}$$

Teplo odebrané spalínám ohřívákem vzduchu v 2. části IV. tahu:

$$Q_{OV2} = \frac{S_{OV2} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{442,8892 \cdot 26,2989 \cdot 183,7322}{1000} = 2140,026 \text{ kW} \quad (9-56)$$

**9.3.8. Přepočet teploty spalín na výstupu z 2. části IV. tahu**Teplo odebrané spalínám v 2. části IV. tahu:

$$Q_{2 IV} = Q_{OV2} = 2140,026 \text{ kW} \quad (9-57)$$

Teplo spalín na vstupu do 2. části IV. tahu:

$$Q_{sp2 IV}^{in} = Q_{sp1 IV}^{out} = 8117,4856 \text{ kW} \quad (9-58)$$

Kde:  $Q_{sp1 IV}^{out}$  ... teplo spalín na výstupu z 1. části IV. tahu [kJ/kg]Teplo spalín na výstupu z 2. části IV. tahu:

$$Q_{sp2 IV}^{out} = Q_{sp2 IV}^{in} - Q_{2 IV} = 8117,4856 - 2140,026 = 5977,4587 \text{ kW} \quad (9-59)$$

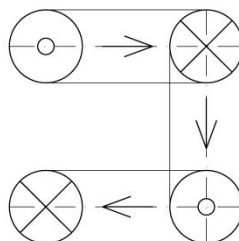
$$I_{sp2 IV}^{out} = \frac{Q_{sp2 IV}^{out}}{M_{pv}} = \frac{5977,4587}{3,512} = 1701,6342 \text{ kJ/kg}$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 2. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{sp2 IV}^{out} = 1701,6342 \text{ kJ/kg}$ . Pro tuto hodnotu odpovídá výstupní teplota spalín  $t_{k2 IV}^{skut} = 280,7755 \text{ °C}$ . Skutečná teplota se od zvolené liší o 0,525 °C, což je přijatelná odchylka.



## 9.4. Výpočet Ekonomizéru.

Ekonomizér slouží k předehřátí vody a dochlazení spalin. Je to první výhřevná plocha ze strany spalin. Podle rady konzultanta by se měla rychlost proudění vody v ekonomizéru pohybovat v rozmezí 0,4 až 1,2 m/s. Zvýšení rychlosti vody řeším dvojitým vyhnutím trubek, viz Obr. 9.6. Aby nedošlo k podkročení rosného bodu spalin na ohříváku vzduchu OV1, je ekonomizér opatřen bypassem viz Obr. 9.3, který slouží k regulaci teploty spalin na výstupu z kotle. Regulace je realizována třicestným ventilem.



**Obr. 9.6:** Princip vyhnutí trubek ekonomizéru

Tepelný výpočet probíhá stejně jako u předchozích výhřevných ploch, přičemž rozměry výhřevné plochy ekonomizéru jsou na Obr. 9.7 a v tabulce 9.7. Vstupní teplota vody je zadaná teplota napájecí vody  $t_{nv} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ , výstupní teplota je brána vzhledem k nedohřevu  $t_{out} = 162,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Parametry vychází z tepelné bilance, viz Tab. 4.2.

Odhadovaná výstupní teplota spalin je  $t_{k3 IV} = 165,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vstupní je rovna skutečné teplotě spalin na výstupu z předchozí části IV. tahu.

**Tab.: 9.7:** rozměry ekonomizéru

	značka	velikost	jednotka
Počet trubek v jedné řadě	$n_{t\text{eko}}$	22	-
Vnější průměr trubek	$D_{\text{eko}}$	0,0318	m
Tloušťka stěn trubek	$t_{\text{eko}}$	0,0036	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{\text{eko}}$	0,0246	m
Počet řad	$Z_{\text{eko}}$	74	-
Rozteč trubek	$Z1_{\text{eko}}$	0,08	m
Rozteč trubek	$Z2_{\text{eko}}$	0,08	m
Efektivní délka trubek	$l_{\text{eko}}$	3,1	m
Počet pater	$n_{\text{pat\text{eko}}}$	1	-

Střední teplota spalin v 3. části IV. tahu:

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{k2 IV}^{skut} + t_{k3 IV}}{2} = \frac{280,7755 + 165,8}{2} = 223,2932 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9-60)$$

$$T_{sp}^{stř} = t_{sp}^{stř} + 273,15 = 223,2932 + 273,15 = 496,4432 \text{ K}$$

### Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Plošný průřez spalín v 3. části IV. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - 2 \cdot n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 3,6 \cdot 3,2 - 2 \cdot 22 \cdot 0,0318 \cdot 3,1 = 7,1824 \text{ m}^2 \quad (9-61)$$

Kde:  $n_{tr}$  ... počet trubek ekonomizéru v jedné řadě  
 $D$  ... vnější průměr trubek ekonomizéru [m]

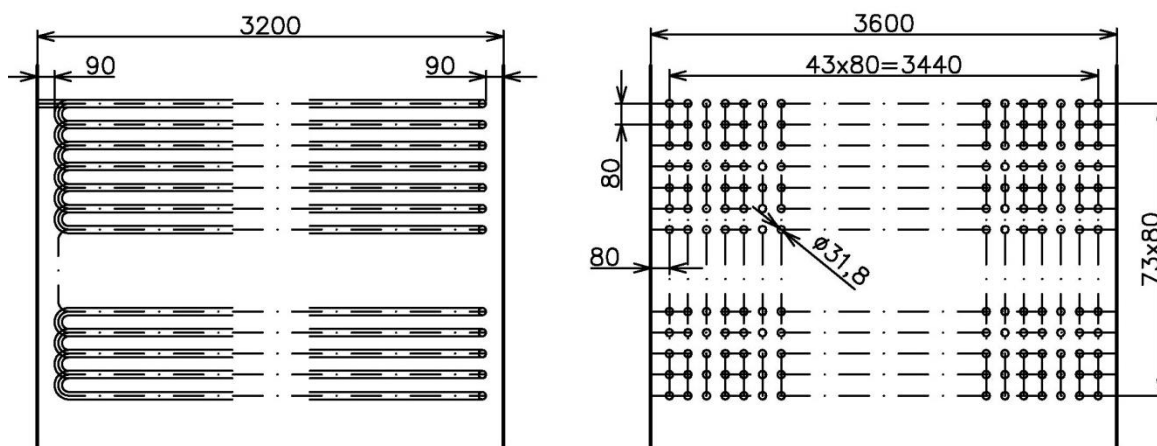
Skutečná rychlost spalín:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{stř})}{273} \quad (9-62)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,256 \cdot 3,512}{2,2707} \cdot \frac{(273 + 223,2932)}{273} = 3,7836 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

#### 9.4.1. Parametry Ekonomizéru

Z důvodu velikosti je ekonomizér rozdělen na tři části pro snadnou přepravu. Mezi každou částí je mezera  $h = 0,8 \text{ m}$  pro servisní otvor.



**Obr. 9.7:** Rozměry ekonomizéru

Střední teplota vody:

$$t_{eko}^{stř} = \frac{t_{eko}^{out} + t_{eko}^{in}}{2} = \frac{162,4 + 105}{2} = 133,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-63)$$

Kde:  $t_{eko}^{out}$  ... teplota vody vystupující z EKO viz. Tab. 4.2  
 $t_{eko}^{in}$  ... teplota vody vstupující z EKO viz. Tab. 4.2

Průtočný průřez pro vodu:

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0246^2}{4} \cdot 22 = 0,0104 \text{ m}^2 \quad (9-64)$$

Rychlost proudění vody v ekonomizéru:

$$w_v = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_v} = \frac{0,95 \cdot 11,111 \cdot 0,00107}{0,0104} = 1,0574 \text{ m/s} \quad (9-65)$$

#### 9.4.2. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (9-66)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0441}{0,0318} \cdot \left( \frac{3,7836 \cdot 0,0318}{0,0000355} \right)^{0,65} \cdot 0,7253^{0,33}$$

$$\alpha_k = 49,5157 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad, pro více jak 10 řad  $c_z = 1$   
 $c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči  
 $\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [-]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,5157 \quad (9-67)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,5157 \rightarrow \sigma_2 \geq 2; \text{ dle [1] volím } C_S = 1 \quad (9-68)$$

**Tab. 9.8:** Parametry spalin pro 3. část IV. tahu

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{sp \text{ eko}}$	0,044143	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{sp \text{ eko}}$	3,56E-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{sp \text{ eko}}$	0,725341	-

#### 9.4.3. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř^3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{sp}^{stř}} \right)^4}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{sp}} \right)^4} \quad (9-69)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2253 \cdot 496,4432^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{418,1009}{496,4432} \right)^4}{1 - \left( \frac{418,1009}{496,4432} \right)^4}$$

$$\alpha_s = 4,4521 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\xi}$  ... stupeň černosti proudu spalin  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalin [K]

Stupeň černosti proudu spalin:

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2578} = 0,2253 \quad (9-70)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (12,6349 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,202 = 0,2578 \quad (9-71)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot MPa^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání vlivem popílkových částic dle [1] neuvažujeme.

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (9-72)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,202}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{223,2932 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 12,6349$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů;  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,0318 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,202 \text{ m} \quad (9-73)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách:

$$t_z = t_{eko}^{stř} + \left( \varepsilon_{eko} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{eko}}{S_{eko}} \cdot 1000 \quad (9-74)$$

$$t_z = 133,6841 + (0,0045 + 0) \cdot \frac{2524,696}{1008,377} \cdot 1000 = 144,9509 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 144,9509 + 273,15 = 418,1009 \text{ K}$$

Kde:  $\varepsilon_{eko}$  ... součinitel zanesení ekonomizéru, volím  $\varepsilon_{eko} = 0,0045$   
 $t_{eko}^{stř}$  ... teplota média v ekonomizéru [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $S_{eko}$  ... plocha trubek ekonomizéru [ $\text{m}^2$ ]

### Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Plocha trubek ekonomizéru:

$$S_{eko} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot 2 \cdot n_{rad} = \pi \cdot 0,0318 \cdot 3,1 \cdot 22 \cdot 2 \cdot 74 = 1008,377 \text{ m}^2 \quad (9-75)$$

#### 9.4.4. Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 48,2504 = 28,9503 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-74)$$

Kde:  $\psi_e$  ... součinitel tepelné efektivity [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (49,1594 + 4,4521) = 48,2504 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9-76)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

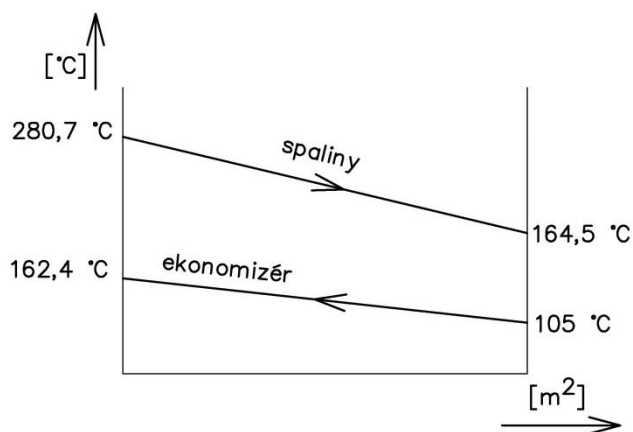
#### 9.4.5. Tepelný výkon Ekonomizéru

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{118,4068 - 60,8}{\ln \frac{118,4068}{60,8}} = 86,4341 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9-77)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2 IV}^{skut} - t_{eko}^{out} = 280,7755 - 162,3682 = 118,4068 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{k3 IV} - t_{eko}^{in} = 165,8 - 105 = 60,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$



**Obr. 9.8:** Tepelné schéma 3. části IV. tahu

Ideální plocha ekonomizéru

$$S_{eko}^{id} = \frac{Q_{eko} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{2524,696 \cdot 1000}{28,9502 \cdot 86,4341} = 1008,953 \text{ m}^2 \quad (9-78)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**Počet řad:

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{eko}}^{\text{id}}}{s_{1-\text{řada}}} = \frac{S_{\text{eko}}^{\text{id}}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{\text{tr}} \cdot 2} \quad (9-79)$$

$$n_{\text{řad}} = \frac{1008,953}{\pi \cdot 0,0318 \cdot 3,1 \cdot 22 \cdot 2} = 74,0423 \rightarrow \text{volím 74 řad}$$

Teplo odebrané spalinám ekonomizérem v 3. části IV. tahu:

$$Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} = \frac{S_{\text{eko}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}}}{1000} \quad (9-80)$$

$$Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} = \frac{1008,377 \cdot 28,9502 \cdot 86,4341}{1000} = 2523,253 \text{ kW}$$

**9.4.6. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části IV. tahu**Teplo odebrané spalinám v 3. části IV. tahu:

$$Q_{3 \text{ IV}} = Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} = 2523,253 \text{ kW} \quad (9-81)$$

Teplo spalin na vstupu do 3. části IV. tahu:

$$Q_{\text{sp3 IV}}^{\text{in}} = Q_{\text{sp2 IV}}^{\text{out}} = 5977,4587 \text{ kW} \quad (9-82)$$

Kde:  $Q_{\text{sp2 IV}}^{\text{out}}$  ... teplo spalin na výstupu z 2. části IV. tahu [kW]Teplo spalin na výstupu z 3. části IV. tahu:

$$Q_{\text{sp3 IV}}^{\text{out}} = Q_{\text{sp3 IV}}^{\text{in}} - Q_{3 \text{ IV}} = 5977,4587 - 2523,253 = 3454,2052 \text{ kW} \quad (9-83)$$

$$I_{\text{sp3 IV}}^{\text{out}} = \frac{Q_{\text{sp3 IV}}^{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{3454,2052}{3,512} = 983,3265 \text{ kJ/kg}$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 3. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 2.3 pro  $I_{\text{sp3 IV}}^{\text{out}} = 983,32 \text{ kJ/kg}$ . Ta se rovná  $t_{k3 \text{ IV}}^{\text{skut}} = 164,563 \text{ °C}$  a od zvolené teploty se liší o  $1,237 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka.

## 10. Výpočet V. tahu

Pátý tah je posledním tahem kotle, je vněm umístěn pouze trubkový svazek prvního ohříváku vzduchu OV1. Rozměry kanálu jsou stejné jako u IV. tahu. Mezi IV. a V. tahem je výsypka popílku. Teplota na konci kotle byla stanovena na 130 °C. Teplota vzduchu vstupujícího do ohříváku vzduchu OV1 je  $t_{OV1}^{in} = 50^\circ\text{C}$ . Té bylo dosaženo promíšením venkovního vzduchu o teplotě 20 °C s recirkulovaným vzduchem o teplotě 200 °C. Procento recirkulace viz rovnice 9-31. Výstupní teplota vzduchu byla stanovena na 90 °C.

Zvolená teplota na výstupu z kotle:  $t_{kV} = 130^\circ\text{C}$

**Tab. 10.1:** Rozměry ohříváku vzduchu OV1

	Značka	Velikost	Jednotka
Počet trubek v jedné řadě	$n_{t\text{oh1}}$	45	-
Vnější průměr trubek	$D_{\text{oh1}}$	0,0445	m
Tloušťka stěn trubek	$tl_{t\text{oh1}}$	0,0032	m
Vnitřní průměr trubek	$d_{\text{oh1}}$	0,0381	m
Počet řad	$Z_{\text{oh1}}$	14	-
Rozteč trubek	$Z1_{\text{oh1}}$	0,08	m
Rozteč trubek	$Z2_{\text{oh1}}$	0,08	m
Efektivní délka trubek	$le_{\text{oh1}}$	3,2	m
Počet pater	$n_{\text{pat oh1}}$	1	-

Střední teplota spalin v V. tahu:

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{k3\text{IV}}^{skut} + t_{kV}}{2} = \frac{165 + 130}{2} = 147,5^\circ\text{C} \quad (10-1)$$

$$T_{sp}^{stř} = t_{sp}^{stř} + 273,15 = 147,5 + 273,15 = 420,65\text{ K}$$

Plošný průřez spalin v V. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 3,6 \cdot 3,2 - 45 \cdot 0,0445 \cdot 3,2 = 5,112\text{ m}^2 \quad (10-2)$$

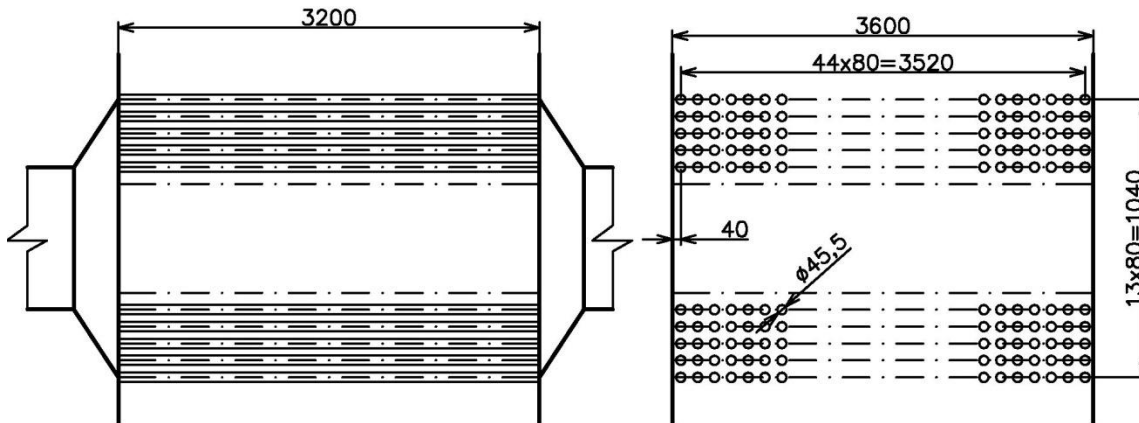
Kde:  $n_{tr}$  ... počet trubek OV1 v jedné řadě  
 $D$  ... vnější průměr trubek OV1 [m]

Skutečná rychlost spalin

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{sp}^{stř})}{273} \quad (10-3)$$

$$w_{sp}^{skut} = \frac{4,256 \cdot 3,512}{5,112} \cdot \frac{(273 + 147,5)}{273} = 4,5045\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 10.1. Výpočet ohříváku vzduchu OV1



Obr. 10.1: Rozměry ohříváku vzduchu OV1

#### 10.1.1. Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (10-4)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9978 \cdot \frac{0,0369}{0,0445} \cdot \left( \frac{4,5045 \cdot 0,0445}{0,0000265} \right)^{0,65} \cdot 0,7405^{0,33}$$

$$\alpha_k = 49,935 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_z$  ... opravný součinitel na počet řad více jak 10. Řad  $c_z = 1$

$c_s$  ... opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{sp}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [-]

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (10-5)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot 1,7977 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,7977}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,9987$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (10-6)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (10-7)$$



Tab. 10.2: Parametry spalín pro V. tah

	Značka	velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{sp, oh1}$	0,03696	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{sp, oh1}$	2,65E-05	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{sp, oh1}$	0,7405	-

### 10.1.2. Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{sp}^{stř3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{stř}}\right)} \quad (10-8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1876 \cdot 420,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{381,9}{420,65}\right)^4}{1 - \left(\frac{381,9}{420,65}\right)}$$

$$\alpha_s = 2,493 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Kde:  $a_{st}$  ... stupeň černosti povrchu stěn,  $a_{st} = 0,8$  [1]  
 $a_{\zeta}$  ... stupeň černosti proudu spalín  
 $T_z$  ... teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách [K]  
 $T_{sp}^{stř}$  ... střední teplota spalín [K]

Stupeň černosti proudu spalín:

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2097} = 0,1876 \quad (10-9)$$

Kde:  $k \cdot p \cdot s$  ... optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (16,6527 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,1247 = 0,2097 \quad (10-10)$$

Kde:  $k_{sp}$  ... součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [ $m^{-1} \cdot MPa^{-1}$ ]  
 $r_{sp}$  ... objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách  
 $k_p \cdot \mu$  ... součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi  
 $p$  ... tlak,  $p = 0,101$  [MPa]  
 $s$  ... efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi dle [1] zanedbávám.

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (10-11)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2072}{3,16 \cdot \sqrt{0,0324 \cdot 0,1247}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{173,5 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3244$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 16,6527$$

Kde:  $r_{H_2O}$ ,  $r_{sp}$  ... objemové části tříatomových plynů;  
 $p_{sp}$  ... celkový parciální tlak [MPa]

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,09 \cdot D \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,0445 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,09}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,1247 \text{ m} \quad (10-12)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách:

$$t_z = \frac{t_{sp}^{stř} + t_{vz}^{stř}}{2} = \frac{147,5 + 70}{2} = 108,75 \text{ °C} \quad (10-13)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 126,75 + 273,15 = 381,9 \text{ °C}$$

### 10.1.3. Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{vz}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vz} \cdot d}{\nu_{vz}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{vz}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10-14)$$

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0297}{0,0381} \cdot \left( \frac{25,3049 \cdot 0,0381}{0,00002008} \right)^{0,8} \cdot 0,71^{0,4} \cdot 0,9479 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_{vz} = 82,6181 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Kde:  $c_t, c_l, c_m$  ... opravné koeficienty [1]

$\lambda_{vz}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu vzduchu [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nu_{vz}$  ... kinematická viskozita pro střední teplotu vzduchu [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Pr_{vz}$  ... prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu vzduchu [-]

$d$  ... vnitřní průměr [m]

$w_{vz}$  ... rychlost proudění vzduchu [m/s]

Opravný koeficient:

$$c_t = \left( \frac{t_{vz}^{stř} + 273,15}{T_z} \right)^{0,5} = \left( \frac{80 + 273,15}{399,9} \right)^{0,5} = 0,9479 \quad (10-15)$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vz}^{stř} = \frac{t_{OV1}^{out} + t_{OV1}^{in}}{2} = \frac{90 + 50}{2} = 70 \text{ °C} \quad (10-16)$$

Průtočný průřez pro vzduch:

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} = \frac{\pi \cdot 0,0381^2}{4} \cdot 45 \cdot 14 = 0,7182 \text{ m}^2 \quad (10-17)$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

Rychlost proudění vzduchu:

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot M_{celk}}{F_{vz}} \cdot \left(1 + \frac{t_{vz}^{stř}}{273}\right) = \frac{3,512 \cdot 4,1186}{0,3921} \cdot \left(1 + \frac{70}{273}\right) = 25,3049 \text{ m/s} \quad (10-18)$$

**Tab. 10.3:** Parametr vzduchu pro ohřívák OV1

	Značka	Velikost	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{v,OV1}$	0,029786	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity	$\nu_{v,OV1}$	2,01E-05	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr_{v,OV1}$	0,71	-

#### 10.1.4. Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{vz} \cdot \alpha_{sp}}{\alpha_{vz} + \alpha_{sp}} = 0,89 \cdot \frac{82,6181 \cdot 52,428}{82,6181 + 52,428} = 34,8934 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (10-19)$$

Kde:  $\xi$  ... součinitel využití plochy, volím  $\xi = 0,85$  [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (49,935 + 2,493) = 52,428 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (10-20)$$

Kde:  $\omega$  ... součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

#### 10.1.5. Tepelný výkon ohříváku vzduchu OV1

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{75 - 80}{\ln \frac{75}{80}} = 77,4731 \text{ } ^\circ C \quad (10-21)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3IV}^{skut} - t_{OV1}^{out} = 165 - 90 = 75 \text{ } ^\circ C$$

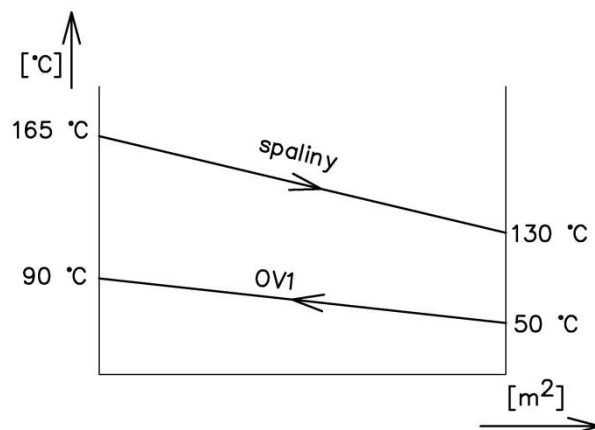
$$\Delta t_2 = t_{kV}^{in} - t_{OV1}^{in} = 130 - 50 = 80 \text{ } ^\circ C$$

Výkon ohříváku vzduchu OV1:

$$Q_{OV1} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot (1 + 0,2) \cdot (I_{out} - I_{in}) \quad (10-22)$$

$$Q_{OV1} = 3,512 \cdot 1,4 \cdot (1 + 0,2) \cdot (292,36 - 162,323) = 767,4113 \text{ kW}$$

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene



Obr. 10.2: Tepelné schéma V. tahu

Plocha ohříváku vzduchu OV1:

$$S_{OV1} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{blokũ} \quad (10-23)$$

$$S_{OV1} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 3,2 \cdot 45 \cdot 14 \cdot 1 = 281,8386 \text{ m}^2$$

Ideální plocha ohříváku vzduchu OV1

$$S_{OV1}^{id} = \frac{Q_{OV1} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{767,4113 \cdot 1000}{34,8934 \cdot 77,4731} = 283,8789 \text{ m}^2 \quad (10-24)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{OV1}^{id}}{s_{1-řada}} = \frac{S_{OV1}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr}} \quad (10-25)$$

$$n_{řad} = \frac{283,8789}{\pi \cdot 0,0445 \cdot 3,2 \cdot 45} = 14,1013 \rightarrow \text{volím 14 řad}$$

Teplo odebrané spalinám ohřívákem vzduchu v V. tahu:

$$Q_{OV1}^{skut} = \frac{S_{OV1} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{281,8386 \cdot 34,8934 \cdot 77,4731}{1000} = 761,895 \text{ kW} \quad (10-26)$$

## 10.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z V. tahu

Teplo odebrané spalinám v V. tahu:

$$Q_V = Q_{OV1}^{skut} = 761,895 \text{ kW} \quad (10-27)$$

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

Teplo spalin na vstupu do V. tahu:

$$Q_{spV}^{in} = Q_{sp3IV}^{out} = 3454,205 \text{ kW} \quad (10-28)$$

Teplo spalin na výstupu V. tahu:

$$Q_{spV}^{out} = Q_{spV}^{in} - Q_V = 3454,205 - 761,895 = 2692,31 \text{ kW} \quad (10-29)$$

$$I_{spV}^{out} = \frac{Q_{spV}^{out}}{M_{pv}} = \frac{2692,31}{3,512} = 766,603 \text{ kJ/kg}$$

Pro vstupní entalpii  $I_{spV}^{out} = 766,603 \text{ kJ/kg}$  získáme lineární interpolací z Tab. 2.3 hodnotu skutečné výstupní teploty  $t_{kV.tah}^{skut} = 128,78 \text{ °C}$  ta se od zvolené liší o  $1,22 \text{ °C}$ , což je přijatelná odchylka. Která může být dorovnána regulací na ekonomizéru.

## 11. Kontrola tepelné bilance

### Tepelná bilance

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_k - \frac{\sum Q_i}{M_{pv}} \cdot \frac{100 - z_c}{100} \quad (11-1)$$

$$\Delta Q = 9526,072 \cdot 0,8971 - \frac{30968,65}{3,512} \cdot \frac{100 - 3,2499}{100} = 16,5195 \text{ kJ/kg}$$

Kde:  $\eta_k$  ... účinnost kotle [%]

$Q_p^p$  ... teplo přivedené do kotle [kJ/kg]

$\sum Q_i$  ... teplo odebrané výhřevnými plochami kromě ohříváku vzduchu [kW]

$z_c$  ... ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích [%]

### Součet tepla všech výhřevných ploch kromě ohříváku vzduchu

$$\sum Q_i = Q_{st} + Q_{mříž} + Q_{II} + Q_{1 III} + Q_{2 III} + Q_{3 III} + Q_{4 III} + Q_{PIa} + Q_{3 IV} = \quad (11-2)$$

$$= 18498,57 + 404,802 + 1624,085 + 988,485 + 2152,076 + 2334,669 + 1304,222 +$$

$$+ 1102,483 + 2523,253$$

$$\sum Q_i = 30968,65 \text{ kW}$$

Kde:  $\eta_k$  ... účinnost kotle [%]

$Q_p^p$  ... teplo přivedené do kotle [kJ/kg]

$\sum Q_i$  ... teplo odebrané výhřevnými plochami kromě ohříváku vzduchu [kW]

$z_c$  ... ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích [%]

### Odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{16,5195}{9526,072} \cdot 100 = 0,1734 \% \quad (11-3)$$

Výsledná odchylka je vyhovující. Odchylka tepelné bilance nesmí přesáhnout toleranci 0,5 %.

## 12. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout parní bubnový kotel pro spalování slámy o parním výkonu 40 t/h. při dodržení zadaných parametrů výstupní teploty přehřáté páry  $t_{pp} = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$  a taku  $p_{pp} = 5,5\text{ MPa}$ , vstupní teploty napájecí vody  $t_{nv} = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$  a výhřevnosti  $Q_i^r = 9,5\text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Nejprve na základě dodaného prvkového rozboru byl proveden stechiometrický výpočet a výpočet tepelné účinnosti kotle nepřímou metodou. V další kapitole bylo vypočteno přerozdělení celkového tepelného výkonu na jednotlivé plochy kotle a stanovení parametrů ohřívání média pro jednotlivé body. Poté se již přistoupilo k návrhu a výpočtu jednotlivých výhřevných ploch.

Kotel je navržen jako pětitaňový s přirozenou cirkulací média. První tři taňy jsou chlazené, tedy tvořeny membránovými stěnami výparníku a zbylé dva jsou nechlazené plechové. První taň je tvořen spalovací komorou ve tvaru L pro zajištění plošného zatížení roštu kotle. Ve spalovací komoře dochází k hoření paliva, které je do kotle přiváděné šnekem ze zásobníku. Hoření probíhá za přivádění spalovacího vzduchu, který je rozdělen mezi primární a sekundární vzduch v poměru 50:50 a teplotě 200 °C. Vzniklé spaliny jsou poté odvedeny ze spalovací komory přes spalinovou mříž v horní části kotle a dále do druhého taňu.

Druhý taň je koncipován jako prázdný z důvodu vysoké výstupní teploty spalin, zde se spaliny vychladí membránovou stěnou. Před vstupem do třetího taňu kotle spaliny prochází vratnou komorou s výsypkou, kde se zbavují části obsahu popílku. Ten je odváděn z důvodu snížení abraze a zanášení teplosměnných ploch nalepováním popílku.

V třetím taňu jsou umístěny trubkové svazky přehříváků PIII, PII a PI-b, ty jsou zavěšeny na závěsných trubkách. Závěsné trubky jsou chlazené sytou párou z bubnu a prochází celým třetím taňem. Mezi jednotlivé přehříváky je řazen vstřík napájecí vody z důvodu regulace teploty přehřáté páry. Mezi jednotlivými svazky je prostor pro servisní průlez a parní ofukovače.

V čtvrtém taňu jsou v následujícím pořadí řazeny trubkové svazky přehříváku PI-a, ohřívák vzduchu OV2 a ekonomizéru. Ekonomizér je rozdělen na tři části, pro snadnější přepravu, mezi kterými je mezera pro ofukovače a průlezy.

Poslední pátý taň je osazen pouze ohřívákem vzduchu OV1, který je poslední teplosměnnou plochou kotle. Výstupní teplota spalin je 130 °C

S výstupní teplotou spalin souvisí nebezpečí nízkoteplotní koroze z důvodu podkročení rosného bodu spalin vlivem vysoké vlhkosti paliva. Což je jedna z nevýhod spalování biomasy. Z tohoto důvodu je ekonomizér opatřen bypassem, tím dochází k regulaci spalin na výstupu kotle. To je realizováno třicestným ventilem. Další nevýhodou spalování biomasy je vysoký sklon k zanášení nalepováním popílku z důvodu jeho nízké teploty měknutí. Z tohoto důvodu jsou všechny teplosměnné plochy v třetím a čtvrtém taňu ofukovány parním ofukovačem z obou stran. V neposlední řadě je také nutné dávat pozor na obsah chlóru v palivu z důvodu nebezpečí chlórové koroze. V mém případě palivo obsahuje max. 0,03 % chlóru, což je stopové množství.

Celý návrh kotle probíhal na základě tepelných výpočtů s pomocí literatury a odborných konzultací. Závěrečná kontrolní bilance potvrdila přesnost návrhu kotle v přijatelné odchylce  $\Delta = 0,1734\text{ }%$ .

## 13. Seznam použitých zdrojů

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle - podklady pro tepelný výpočet*. Vyd. 4. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992.
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 109 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-3955-9.
- [3] HOLMGREN, Magnus. *X Steam version 2.6*. Excel Steam Tables.
- [4] ČEZ. *Jak funguje výroba energie z biomasy* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z:  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje/biomasa/flash-model-jak-funguje-vyroba-energie-z-biomasy.html>



## 14. Seznam zkratek a použitých symbolů

Značka	Jednotka	Popis
$a$	[m]	Šířka tahu
$a_{\varepsilon}$	[-]	Stupeň černosti proudu spalin
$a_o$	[-]	Stupeň černosti ohniště
$a_{pl}$	[-]	Efektivní stupeň černosti ohniště
$a_{st}$	[-]	Stupeň černosti povrchu stěn
$A'$	[%]	Obsah popeloviny
$b$	[m]	Délka ohniště
$b_{II}$	[m]	Délka 2. tahu
$b_{III}$	[m]	Délka 3. tahu
$b_{IV-V}$	[m]	Délka 4. a 5. tahu
$h_{mříž}$	[m]	Výška mříže
$c_i$	[kJ/KgK]	Měrné teplo popílku
$c_p$	[kJ/KgK]	Měrné teplo paliva
$c_s$	[-]	Opravný součinitel na uspořádání svazku
$c_t, c_l, c_m$	[-]	Opravné koeficienty pro podélnou konvekci
$c_{suš}$	[kJ/KgK]	Měrné teplo sušiny
$c_z$	[-]	Opravný součinitel na počet řad
$C_i$	[%]	Obsah spalitelných látek v pevných zbytcích
$d$	[m]	Vnitřní průměr trubek
$D$	[m]	Průměr trubek
$f$	[-]	Součinitel respektující podíl vodní páry na 1 Nm <sup>3</sup>
$F_p$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro páru
$F_{sp}$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez spalin
$F_{st}$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch stěn
$F_v$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro vodu
$F_{vz}$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro vzduch
$h_x$	[m]	Výška daného prvku
$i_x^{in}$	[kJ/Kg]	Entalpie daného média na vstupu
$i_p$	[kJ/Kg]	Fyzické teplo paliva
$i_{nv}$	[kJ/Kg]	Entalpie napájecí vody
$i_x^{out}$	[kJ/Kg]	Entalpie daného média na výstupu
$i_{pp}$	[kJ/Kg]	Entalpie přehřáté páry
$I_o$	[kJ/Kg]	Entalpie spalin na výstupu z ohniště
$I_u$	[kJ/Kg]	Užitečné teplo uvolněné ve spalovací komoře
$I_{SP\_min}^X$	[kJ/Kg]	Entalpie minimálního množství daného druhu spalin
$k$	[m <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	Součinitel zeslabení sálání

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

$k$	[W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel prostupu tepla
$k.p.s$	[-]	Optická hustota spalin
$k_p.\mu$	[m <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
$k_p.r_{sp}$	[m <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
$l_e$	[m]	Efektivní délka trubek
$M$	[-]	Součinitel M
$M_{pv}$	[kg/s]	Množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pp}$	[kg/s]	Parní výkon kotle
$M_{pv}$	[kg/s]	Skutečně spálené množství paliva
$M_{rec}$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Množství recirkulovaného vzduchu
$M_l$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Množství primárního vzduchu
$n_{bloků}$	[-]	Počet bloků
$n_{hadů}$	[-]	Počet hadů
$n_{tr}$	[-]	Počet trubek
$n_{řad}$	[-]	Počet řad
$O$	[m]	Obvod
$O_{XX}$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Množství daného prvku ve spalinách
$O_{SP\_min}^X$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství daného druhu spalin
$O_{SP}^{H_2O\ min}$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství vodní páry ve spalinách
$O_{VZ\ skut}^X$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství daného druhu vzduchu
$O_{SP\ skut}^X$	[Nm <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství daného druhu spalin
$p$	[MPa]	Tlak
$p_x^{in}$	[MPa]	Tlak v dané části na vstupu
$p_x^{out}$	[MPa]	Tlak v dané části na výstupu
$p_{sp}$	[MPa]	Parciální tlak tříatomových plynů
$pr_{sp}$	[-]	Prandtlovo číslo spalin
$pr_{vz}$	[-]	Prandtlovo číslo vzduchu
$q_s$	[MW/m <sup>2</sup> ]	Tepelné zatížení roštu
$Q_i^r$	[kJ/kg]	Výhřevnost paliva
$Q_{ms}$	[kW]	Teplo odebrané membránovou stěnou
$Q_{sp}^{in}$	[kW]	Teplo spalin na vstupu
$Q_{sp}^{out}$	[kW]	Teplo spalin na výstupu
$Q_{př}$	[kW]	Teplo odebrané přehřívákem
$Q_p^P$	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle
$Q_{výp}$	[kW]	Teplo odebrané výparníkem
$Q_v$	[kJ/s]	Výrobní teplo páry
$Q_{vz}$	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle se vzduchem
$Q_{zt}$	[kW]	Teplo odebrané závěsnými trubkami

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

$Q_{XX}$	[kW]	Teplo odebrané v dané části daného tahu
$r_{H_2O}$	[-]	Objemový podíl H <sub>2</sub> O ve spalínách
$r_{RO_2}$	[-]	Objemový podíl SO <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> ve spalínách
$r_{sp}$	[-]	Objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách
$s$	[m]	Efektivní tloušťka sálavé vrstvy
$s_1$	[m]	Příčná rozteč
$s_2$	[m]	Podélná rozteč
$S_{akt}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha aktivních otrubkovaných stěn
$S_{pred}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha přední stěny
$S_{bok}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha boční stěny
$S_{zad}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha zadní stěny
$S_X$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha trubek daného svazku
$S_X^{id}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha trubek daného svazku ideální
$S_{mříž}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha mříže
$S_o$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha roštu
$S_{ov}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha ohříváku vzduchu
$S_{celk}$	[m <sup>2</sup> ]	Celková plocha výhřevných ploch v dané části
$S_{př}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha přehříváku
$S_{řada}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha jedné řady
$S_{zt}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha závěsných trubek
$tl$	[m]	Tloušťka stěny trubky
$t_{kx}$	[°C]	Teplota na výstupu z X-té části
$t_{ad}$	[°C]	Adiabatická teplota
$t_x^{in}$	[°C]	Teplota daného média na vstupu
$t_x^{out}$	[°C]	Teplota daného média na výstupu
$t_p$	[°C]	Teplota paliva
$t_i$	[°C]	Teplota popílku
$t_{sp}^{stř}$	[°C]	Střední teplota spalín
$t_z$	[°C]	Teplota vnějšího povrchu nánosů na stěnách
$T_{sp}^{stř}$	[K]	Střední teplota spalín
$T_z$	[K]	Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$v_{stř}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Střední měrný objem
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem sálající vrstvy
$V_o$	[m <sup>3</sup> ]	Objem spalovací komory
$w_p$	[m/s]	Rychlost páry
$w_{sp}$	[m/s]	Rychlost spalín
$w_v$	[m/s]	Rychlost proudění vody
$w_{vz}$	[m/s]	Rychlost vzduchu

## Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene

$W^r$	[%]	Vlhkost paliva
$X_i$	[%]	Bilance popele
$X_p$	[%]	Procento popílku v úletu
$z_c$	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem
$z_f$	[%]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$z_{cn}$	[%]	Ztráta chemickým nedopalem
$z_k$	[%]	Komínová ztráta
$z_{sv}$	[%]	Ztráta sdílením tepla do okolí
$\alpha$	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
$\alpha_k$	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_p$	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla ze strany páry
$\alpha_s$	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_{sp}$	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla ze strany spalin
$\alpha_{vz}$	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu
$\Delta_i$	[kJ/kg]	Entalpický spád
$\Delta t_{ln}$	[°C]	Teplotní logaritmický spád
$\Delta t_1$	[°C]	Teplotní spád
$\Delta p$	[MPa]	Tlaková ztráta
$\Delta Q$	[kJ/kg]	Tepelná bilance
$\varepsilon$	[-]	Součinitel zanesení
$\lambda$	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
$\varphi$	[-]	Součinitel uchování tepla
$\eta_k$	[%]	Účinnost kotle
$\mu$	$[\text{g/m}^3]$	Koncentrace popílku ve spalinách
$\nu$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	Součinitel kinematické viskozity
$\xi$	[-]	Součinitel využití plochy
$\sigma_1$	[-]	Poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[-]	Poměrná podélná rozteč
$\psi$	[-]	Součinitel tepelné efektivity stěn
$\sigma_1$	[-]	Poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[-]	Poměrná podélná rozteč

## 15. Seznam tabulek, obrázků a příloh

### 15.1. Seznam obrázků

- Obr. 2.1: I-t diagram vzduchu a spalin
- Obr. 4.1: Bilanční schéma druhého vstříku napájecí vody
- Obr. 4.2: Bilanční schéma prvního vstříku napájecí vody
- Obr. 4.3: Pilový diagram
- Obr. 5.1: Řez membránovou stěnou spalovací komory
- Obr. 5.2: Rozměry spalovací komory
- Obr. 6.1: Řez a princip rozvolnění membránové stěny
- Obr. 6.2: Tepelné schéma mříže
- Obr. 7.1: Rozměry druhého tahu
- Obr. 7.2: Řez membránovou stěnou II. tahu
- Obr. 7.3: Tepelné schéma II. tahu
- Obr. 8.1: Rozměry vratné komory
- Obr. 8.2: Řez membránovou stěnou III. tahu
- Obr. 8.3: Tepelné schéma 1. části III. tahu
- Obr. 8.4: Rozměry přehříváku III
- Obr. 8.5: Tepelné schéma 2. části III. tahu
- Obr. 8.6: Rozměry přehříváku II
- Obr. 8.7: Tepelné schéma 3. části III. tahu
- Obr. 8.8: Rozměry přehříváku I-b
- Obr. 8.9: Tepelné schéma 4. části III. tahu
- Obr. 9.1: Rozměry přehříváku I-a
- Obr. 9.2: Tepelné schéma 1. části IV. tahu
- Obr. 9.3: Schéma zapojení a bilance ohřívání vzduchu
- Obr. 9.4: Rozměry ohříváku vzduchu OV2
- Obr. 9.5: Tepelné schéma 2. části IV. tahu
- Obr. 9.6: Princip vyhnutí trubek ekonomizéru
- Obr. 9.7: Rozměry ekonomizéru
- Obr. 9.8: Tepelné schéma 3. části IV. tahu
- Obr. 10.1: Rozměry ohříváku vzduchu OV1
- Obr. 10.2: Tepelné schéma V. tahu

### 15.2. Seznam tabulek

- Tab. 2.1: Prvkový rozbor paliva
- Tab. 2.2: Měrné entalpie vybraných složek spalin
- Tab. 2.3: Vypočtené hodnoty entalpie
- Tab. 3.1: Bilance popílku v jednotlivých částech kotle
- Tab. 4.1: Tlakové ztráty částí kotle
- Tab. 5.1: Zvolené rozměry prvního tahu
- Tab. 6.1: Konstrukční parametry mříže
- Tab. 6.2: Parametry spalin pro mříž
- Tab. 7.1: Parametry spalin pro II. tah

**Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování slámy z pšenice, žita a ječmene**

- Tab. 8.1: Parametry spalin 1. části III. tahu
- Tab. 8.2: Rozměry závěsných trubek
- Tab. 8.3: Parametry páry pro závěsné trubky vratné komory
- Tab. 8.4: Parametry spalin v 2. části III. tahu
- Tab. 8.5: Rozměry třetího přehříváku
- Tab. 8.6: Parametry páry pro přehřívák III
- Tab. 8.7: Parametry páry pro závěsné trubky přehříváku III
- Tab. 8.8: Rozměry přehříváku II
- Tab. 8.9: Parametry spalin v 3. Části III. tahu
- Tab. 8.10: Parametry páry pro přehřívák II
- Tab. 8.11: Parametry spalin pro závěsné trubky přehříváku II
- Tab. 8.12: Rozměry přehříváku I-b
- Tab. 8.13: Parametry spalin pro 4. část III. tahu
- Tab. 8.14: Parametry páry pro přehříváku I-b
- Tab. 8.15: Parametry páry pro závěsné trubky přehříváku I-b
- Tab. 9.1: Rozměry přehříváku I-a
- Tab. 9.2: Parametry pro spaliny 1. části IV. tahu
- Tab. 9.3: Parametry páry pro přehřívák I-a
- Tab. 9.4: Rozměry ohříváku vzduchu OV2
- Tab. 9.5: Parametry spalin pro 2. část IV. tahu
- Tab. 9.6: Parametry vzduchu pro ohřívák vzduchu OV2
- Tab. 9.7: Rozměry ekonomizéru
- Tab. 9.8: Parametry spalin pro 3. část IV. tahu
- Tab. 10.1: Rozměry ohříváku vzduchu OV1
- Tab. 10.2: Parametry spalin pro V. tah
- Tab. 10.3: Parametr vzduchu pro ohřívák OV1

**15.3. Seznam příloh**

Výkresová dokumentace kotle