



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH GRANULAČNÍHO KOTLE NA ČERNÉ UHLÍ, 540 °C, 9,4 MPA, TNV = 170 °C

DRAFT DRY BOTTOM BOILER FOR BITUMINOS COAL, 540 °C, 9,4 MPA, FEED WATER T = 170 °C

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Podhorský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2017





## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Jakub Podhorský**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

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

### **Návrh granulačního kotle na černé uhlí, 540 °C, 9,4 MPa, t<sub>nv</sub> = 170 °C**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Návrh granulačního kotle maximálního možného výkonu na černé uhlí do prostoru po zdemontovaném kotli se zachováním původní mlýnice. Při návrhu kotle je nutno řešit minimalizaci tvorby NO<sub>x</sub> a uvažovat s prostorem pro užití metody SCR a umístění katalyzátoru.

Palivo: černé uhlí– výhřevnost 25,01 MJ/kg.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Provést stechiometrický a tepelný výpočet kotle.
- Provést základní rozměrový návrh kotle.

#### **Seznam doporučené literatury:**

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 9788001037577.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce na téma *Návrh granulačního kotle na černé uhlí* se zabývá tepelným návrhem kotle, který má být zastaven do stávající kotelny na místo demontovaného kotle. Při návrhu je také uvažováno s využitím metody SCR pro dosažení emisních limitů NO<sub>x</sub>.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Granulační kotel, černé uhlí, SCR, tepelný výpočet

## **ABSTRACT**

This masters' thesis deals with a thermal design of a draft dry bottom boiler for bituminous coal that should replace a disassembled boiler in a current boiler room. Application of SCR is intended in order to reach emission standards of NO<sub>x</sub>.

## **KEYWORDS**

Dry bottom boiler, bituminous coal, SCR, thermal design

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PODHORSKÝ, J. *Návrh granulačního kotle na černé uhlí, 540°C, 9,4 MPa,  $t_{nv}=170^{\circ}\text{C}$* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 95 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně a pod vedením doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. a konzultanta Ing. Roberta Bursy s využitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 25. 5. 2017

.....

Jakub Podhorský

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. Robertovi Bursovi z firmy PROVYKO za všechny rady, připomínky a cenné informace při zpracování diplomové práce. Dále děkuji všem, kteří mě jakkoliv podporovali.



**OBSAH**

1	Úvod.....	10
2	Přepočty paliva .....	11
3	Stechiometrie .....	12
3.1	Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva.....	12
3.2	Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin .....	14
3.3	Entalpie vzduchu a produktů spalování .....	17
4	Tepelná bilance kotle .....	20
4.1	Teplo přivedené do kotle.....	20
4.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost .....	20
4.3	Výrobní teplo páry a množství paliva .....	21
5	Návrh spalovací komory .....	22
5.1	Výpočet konstrukčních rozměrů .....	23
5.2	Tepelný výpočet ohniště .....	23
6	Návrh teplosměnných ploch .....	26
7	PP3 a doplňkové plochy .....	30
7.1	Přehřívák páry 3 .....	32
7.2	Přehřívák páry 1 (1. část) .....	37
7.3	Výparník (membránové stěny v oblasti PP3).....	40
8	PP4 a doplňkové plochy .....	42
8.1	Přehřívák páry 4 .....	44
8.2	Přehřívák páry 1 (2. část) .....	49
8.3	Výparník (membránové stěny na bocích tahu) .....	52
8.4	Výparník (šikmá membránová stěna) .....	54
9	Mříž.....	56
10	PP2 a doplňkové plochy .....	60
10.1	Přehřívák páry 2 .....	61
10.2	Přehřívák páry 1 (3. část) .....	66
10.3	Přehřívák páry 1 (4. část) .....	69
11	Ekonomizér.....	73
11.1	Ekonomizér – 2. díl.....	73
11.2	Ekonomizér – 1. díl.....	77
12	Ohřívák vzduchu.....	81
12.1	Rosný bod.....	81
12.2	Trubkový ohřívák vzduchu .....	81
13	Kontrola tepelné bilance .....	86
14	Denitrifikace .....	86
14.1	SNCR .....	86
14.2	SCR .....	87
14.3	Popis použité technologie .....	89
15	Závěr .....	90

# 1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je navrhnout kotel s granulačním ohništěm pro parametry výstupní páry 540 °C, 9,4 MPa a maximálním možným parním výkonem tak, aby bylo možné kotel zastavit do stávající kotelny.

Kotel na spalování černého uhlí bude proveden jako vysokotlaký, granulační, bubnový s přirozenou cirkulací ve výparníkovém okruhu. Kotel bude mít 2 tahy. Spalovací komora bude provedena se spodním přívodem paliva. Pro dosažení požadovaného přehřátí páry budou použity 4 přehříváky páry. Regulace teploty páry bude zajištěna pomocí 2 vstříků napájecí vody. Ohříváky vody a vzduchu budou umístěny ve druhém tahu kotle. Ve druhém tahu je taktéž uvažováno s prostorem pro použití metody SCR.

K přípravě paliva se nadále bude používat stávající mlecí okruh, jehož schéma je součástí příloh diplomové práce (Příloha 3). Jedná se o uzavřený mlecí okruh se zásobníkem prášku a se dvěma trubnatými mlýny. Surové uhlí je dopravováno ze zásobníku surového uhlí pomocí dopravníku do mlýna, poté je unášeno sušicím médiem přes třídič do odlučovače uhelného prášku. Odloučený prášek je odtud dopravován šnekovými dopravníky do zásobníku prášku. Neodloučená směs odchází přes mlýnský ventilátor do brýdových hořáků a také zpět do mlecího okruhu. Koule obsažené v mlýnu se v určitých intervalech doplňují. Po 2 letech je potřeba obsah bubnu vysypat a koule vytřídit. K sušení paliva je možné použít studený vzduch nebo směs horkých a studených spalin (horké spaliny je možno odebírat v obrátové komoře, studené spaliny lze odebírat za kotlem). Při dostatečném množství prášku v zásobníku dochází k odstavení mlýnice.

Při provozu mlýnice vytváří mlýnský ventilátor v části systému podtlak. Kvůli netěsnostem v mlecím okruhu dochází při provozu k přísávání falešného vzduchu, což ovlivňuje ohřívák vzduchu. Přebytek vzduchu za ohřívákem vzduchu musí být menší o množství přísávaného falešného vzduchu v mlecím okruhu a ve spalovací komoře, aby bylo dosaženo požadovaného přebytku vzduchu v ohništi. Důsledkem je menší odběr tepla ze spalin v oblasti ohříváku vzduchu a následné zvýšení teploty odchodících spalin. Když je mlecí okruh odstaven a primární směs je dopravována vzduchem, stává se celý systém přetlakový a k přísávání falešného vzduchu dochází jenom ve spalovací komoře. Proto musí být přebytek vzduchu za ohřívákem vzduchu v tomto případě menší pouze o přísávání ve spalovací komoře.

Tepelný výpočet bude proveden pro stacionární stav při jmenovitém výkonu kotle s odstaveným mlýnským okruhem, kdy je palivo do kotle dodáváno pouze ze zásobníku prášku.

Při návrhu je nutné zohlednit emise NO<sub>x</sub>. Pro splnění emisních limitů NO<sub>x</sub> bude využito jak primárních, tak sekundárních opatření.

Výpočet bude proveden v programu MS Excel 2010. Pro určení termodynamických vlastností vody a páry budou použity parní tabulky X Steam v. 2.6. Pro určování fyzikálních vlastností páry a spalin budou použity tabulky v [1]. Ve výpočtech bude postupováno podle [1].

## 2 PŘEPOČTY PALIVA

Jelikož bude tepelný výpočet proveden pro stav, kdy je odstavený mlýnský okruh a palivo je do hořáků dodáváno ze zásobníku prášku, je nutné přepočítat složení paliva na obsah vody  $W^r=1,5\%$ , což je hodnota stanovená po odborné konzultaci odpovídající stavu vysušeného prášku v zásobníku. Vlastnosti paliva v zadání diplomové práce platí pro uhlí dodávané z dolu. Přepočty paliva byly provedeny podle [2].

### Spalné teplo původního vzorku

$$Q_s^r = Q_i^r + 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) \quad (2.1)$$

$$Q_s^r = 25010 + 2453 \cdot \left( \frac{7,1}{100} + 9 \frac{3,93}{100} \right) = 26051,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### Spalné teplo bez vody a popela

$$Q_s^{daf} = \frac{Q_s^r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{26051,8}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 34940,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2.2)$$

### Prvkové složení hořlaviny bez vody a popela

$$S^{daf} = \frac{S_r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{\frac{0,45}{100}}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,0061 \quad (2.3)$$

$$N^{daf} = \frac{N_r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{\frac{1,11}{100}}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,0149 \quad (2.4)$$

$$C^{daf} = \frac{C_r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{\frac{63,25}{100}}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,8483 \quad (2.5)$$

$$H^{daf} = \frac{H_r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{\frac{3,93}{100}}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,0527 \quad (2.6)$$

$$O^{daf} = \frac{O_r}{(1 - A^r - W^r)} = \frac{\frac{5,82}{100}}{\left(1 - \frac{18,34}{100} - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,0781 \quad (2.7)$$

### Obsah popela v bezvodém stavu

$$A^d = \frac{A_r}{(1 - W^r)} = \frac{\frac{18,34}{100}}{\left(1 - \frac{7,1}{100}\right)} = 0,1974 \quad (2.8)$$

**Výhřevnost paliva při obsahu vody  $W^r=1,5\%$** 

$$Q_i^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W^r) \cdot (1 - A^d) - 2453 \cdot [W^r + 9 \cdot H^r \cdot (1 - W^r) \cdot (1 - A^d)] \quad (2.9)$$

$$Q_i^r = Q_s^{daf} \cdot \left(1 - \frac{1,5}{100}\right) \cdot (1 - 0,1974) - 2453 \cdot \left[\frac{1,5}{100} + 9 \cdot 0,0527 \cdot \left(1 - \frac{1,5}{100}\right) \cdot (1 - 0,1974)\right] = 26665,5 \frac{kJ}{kg}$$

**Prvkové složení paliva při obsahu vody  $W^r=1,5\%$** 

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 0,1974 \cdot \left(1 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,1945 \quad (2.10)$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 0,0061 \cdot \left(1 - 0,1945 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,0048 \quad (2.11)$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 0,0149 \cdot \left(1 - 0,1945 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,0118 \quad (2.12)$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 0,8483 \cdot \left(1 - 0,1945 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,6706 \quad (2.13)$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 0,0527 \cdot \left(1 - 0,1945 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,0417 \quad (2.14)$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 0,0781 \cdot \left(1 - 0,1945 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,0617 \quad (2.15)$$

$$S_{prch,2}^r = S_{prch,1}^r \cdot \frac{1 - W_2^r}{1 - W_1^r} = \frac{0,37}{100} \cdot \frac{1 - \frac{1,5}{100}}{1 - \frac{7,1}{100}} = 0,0039 \quad (2.16)$$

**3 STECHIOMETRIE****3.1 MINIMÁLNÍ OBJEMY VZDUCHU A SPALIN Z PRVKOVÉHO ROZBORU PALIVA****Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva**

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (3.1)$$

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \left( \frac{67,06}{12,01} + \frac{4,17}{4,032} + \frac{0,39}{32,06} - \frac{6,17}{32} \right)$$

$$O_{O_2min} = 1,4412 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$O_{vzmin}^s = \frac{100}{21} O_{O_2min} \quad (3.2)$$

$$O_{vzmin}^s = \frac{100}{21} 1,4412$$

$$O_{vzmin}^s = 6,8628 \frac{m^3}{kg}$$

**Objem vodní páry na 1 m<sup>3</sup> suchého vzduchu**

$$V_{H_2O} = \varphi \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (3.3)$$

pro  $\varphi=60\%$ ,  $t=25\text{ }^\circ\text{C}$

$$V_{H_2O} = 0,6 \frac{3166}{98100 - 0,6 \cdot 3166}$$

$$V_{H_2O} = 0,01975$$

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

$$O_{vzmin} = f \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.4)$$

kde součinitel  $f$  se vypočítá podle:

$$f = 1 + \varphi \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (3.5)$$

$$f = 1 + 0,6 \frac{3166}{98100 - 0,6 \cdot 3166} = 1,01975$$

$$O_{vzmin} = 1,01975 \cdot 6,8628 = 6,9983 \frac{m^3}{kg}$$

**Minimální množství suchých spalin**

$$O_{spmin}^s = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (3.6)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,25}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.7)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,25}{100} \cdot \frac{67,06}{12,01} + 0,0003 \cdot 6,8628 = 1,2450 \frac{m^3}{kg}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{prch}^r}{32,06} \quad (3.8)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,39}{32,06} = 0,0027 \frac{m^3}{kg}$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.9)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{1,18}{28,016} + 0,7805 \cdot 6,8621 = 5,3653 \frac{m^3}{kg}$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.10)$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 6,8628 = 0,0631 \frac{m^3}{kg}$$

$$O_{spmin}^s = 1,2450 + 0,0027 + 5,3653 + 0,0631 = 6,6767 \frac{m^3}{kg}$$

### Maximální množství CO<sub>2</sub> ve spalínách

$$(CO_2)_{max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{spmin}^s} \cdot 100 \quad (3.11)$$

$$(CO_2)_{max} = \frac{1,2450}{6,6767} \cdot 100 = 18,65 \%$$

### Minimální objem vodní páry

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.12)$$

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{4,17}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{1,5}{18,016} + (1,01975 - 1) \cdot 6,8628$$

$$O_{H_2Omin} = 0,6172 \frac{m^3}{kg}$$

### Minimální množství vlhkých spalín

$$O_{spmin} = O_{spmin}^s + O_{H_2Omin} \quad (3.13)$$

$$O_{spmin} = 6,6767 + 0,6172 = 7,2938 \frac{m^3}{kg}$$

## 3.2 SOUČINITEL PŘEBYTKU VZDUCHU A OBJEMY VZDUCHU A SPALIN

Součinitel přebytku vzduchu na konci ohniště  $\alpha_0=1,15$

Součinitel přebytku vzduchu na výstupu z ohříváku vzduchu na straně vzduchu

$$\beta''_{OVZ} = \alpha_0 - \Delta\alpha_0 = 1,15 - 0,05 = 1,1 \quad (3.14)$$

kde  $\Delta\alpha_0$  je přísávání falešného vzduchu v komoře (hodnota určena po konzultaci).

**Součinitel přebytku vzduchu na vstupu (bez recirkulace)**

$$\beta'_{OVZ} = \beta''_{OVZ} + \Delta\alpha_{OVZ} = 1,1 + 0,04 = 1,14 \quad (3.15)$$

kde  $\Delta\alpha_{OVZ}$  je přísávání falešného vzduchu v oblasti ohříváku vzduchu (hodnota určena z [1]).

**Skutečné množství vzduchu**

$$O_{vz} = \beta \cdot O_{vzmin} = 1,14 \cdot 6,9983 = 7,9781 \frac{m^3}{kg}$$

kde  $\beta$  se určí z rovnice (3.15)

**Skutečné množství spalin**

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} \quad (3.16)$$

$$O_{sp} = 7,2938 + (1,15 - 1) \cdot 6,9983 = 8,3436 \frac{m^3}{kg}$$

**Objemové části tříatomových plynů**

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{sp}} \quad (3.17)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,0027 + 1,2450}{8,3436} = 0,1495$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} \quad (3.18)$$

kde objem vody se určí podle:

$$O_{H_2O} = O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s \quad (3.19)$$

$$O_{H_2O} = 0,6172 + (1,01975 - 1) \cdot (1,15 - 1) \cdot 6,8628 = 0,6375 \frac{m^3}{kg}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,6375}{8,3436} = 0,0764$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{sp}} \cdot \frac{X_p}{100} \quad (3.20)$$

kde  $X_p$  je určeno podle tabulky (6-3) v [1] na str. 62

$$\mu = \frac{10 \cdot 19,45}{8,3436} \cdot \frac{87}{100} = 20,2762 \frac{g}{m^3}$$

**Součet objemových částí tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1495 + 0,0764 = 0,2259 \quad (3.21)$$

**Hmotové minimální množství spalovacího kyslíku**

$$G_{O_2min} = \frac{32}{100} \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (3.22)$$

$$G_{O_2min} = \frac{32}{100} \left( \frac{67,06}{12,01} + \frac{4,17}{4,032} + \frac{0,39}{32,06} - \frac{6,17}{32} \right) = 2,0598 \frac{kg}{kg}$$

**Hmotové minimální množství suchého spalovacího vzduchu na 1 kg spáleného paliva**

$$G_{vzmin}^s = \frac{1}{0,2331} \cdot G_{O_2min} \quad (3.23)$$

$$G_{vzmin}^s = \frac{1}{0,2331} \cdot 2,0598 = 8,8364 \frac{kg}{kg}$$

**Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu**

$$G_{vzmin} = G_{vzmin}^s + (f - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot G_{O_2min} \quad (3.24)$$

$$G_{vzmin} = 8,8364 + (1,01975 - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot 1,4412 = 8,9453 \frac{kg}{kg}$$

**Hmota vlhkého vzduchu s přebytkem  $\beta$** 

$$G_{vz} = \beta \cdot G_{vzmin} = 1,14 \cdot 8,9453 = 10,1977 \frac{kg}{kg} \quad (3.25)$$

**Hmota vlhkých spalin při použití vlhkého vzduchu s přebytkem  $\alpha$** 

$$G_{sp} = 1 + \alpha \cdot G_{vzmin} = 1 + 1,15 \cdot 8,9453 = 11,2872 \frac{kg}{kg} \quad (3.26)$$

**Hmota vlhkých spalin při použití vlhkého vzduchu s přebytkem  $\alpha$  a při  $A^r$  % popelovin v palivu**

$$G_{sp} = 1 - \frac{A}{100} + \alpha \cdot G_{vzmin} = 1 - \frac{19,45}{100} + 1,15 \cdot 8,9453 = 11,0927 \frac{kg}{kg} \quad (3.27)$$



### 3.3 ENTALPIE VZDUCHU A PRODUKTŮ SPALOVÁNÍ

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg tuhého paliva

$$I_{sp} = I_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzmin} + I_p \quad (3.28)$$

$$I_{spmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (3.29)$$

kde  $i$  jsou entalpie jednotlivých složek spalin a odečtou se z tabulky 3-1

Entalpie minimálního množství vzduchu při  $\alpha=1$  se určí ze vztahu

$$I_{vzmin} = O_{vzmin}^s \cdot (ct)_{vz} \quad (3.30)$$

Obsah vody ve vzduchu

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 1,01975 \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 12,2784 \frac{g}{kg} \quad (3.31)$$

Jelikož je  $d > 10$  g/kg, určí se měrné teplo vlhkého vzduchu následně

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} \quad (3.32)$$

kde  $c_s$  [kJ/m<sup>3</sup>K] je měrné teplo suchého vzduchu a  $c_{H_2O}$  [kJ/m<sup>3</sup>K] je měrné teplo vodní páry a odečtou se z tabulky (3-1) a (3-2) v [1] na str. 23,  $d$  se spočítá podle rovnice (3.31).

Entalpie popílku  $I_p$  ve spalinách se uvažuje, jen pokud platí následující nerovnost:

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} \quad (3.33)$$

$$A^r = 19,45 \% ; \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} = \frac{6 \cdot 26665,5}{41,8 \cdot 87} = 44$$

$$19,45 \not> 44$$

Protože tato nerovnost neplatí, neuvažují entalpii popílku ve spalinách.

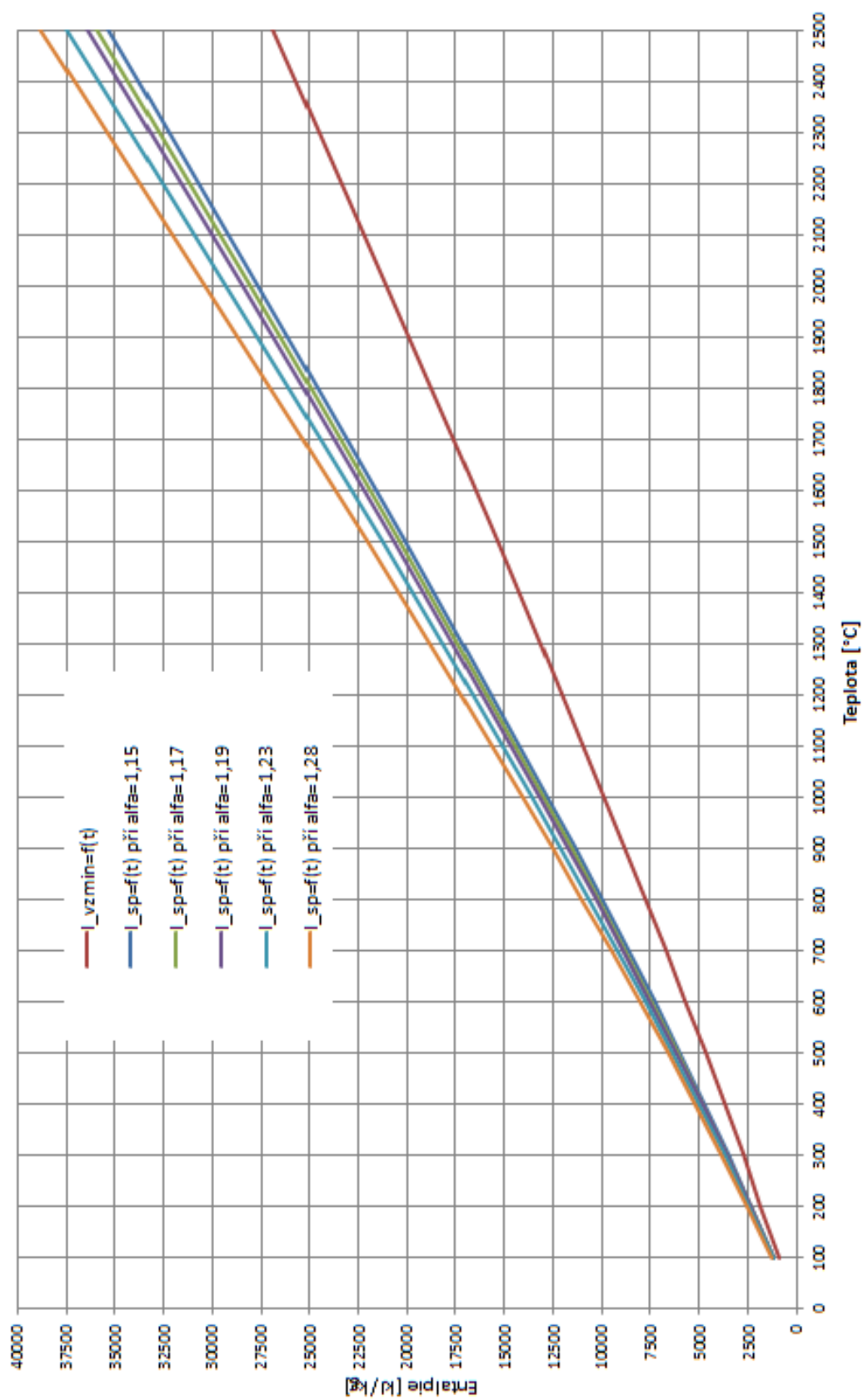
Výsledky výpočtů jednotlivých veličin jsou uvedeny v tabulce 3-2 a obrázku 3-1.

Tab. 3-1 Entalpie složek spalín (podle tabulky (3-6) v [1])

t [°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/kg]	c <sub>s</sub> [kJ/m <sup>3</sup> K]	c <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [kJ/m <sup>3</sup> K]
100	132	170	130	150	189	93	80,8	1,3	1,505
200	267	357	260	304	392	186	169	1,307	1,522
300	407	559	392	463	610	278	264	1,317	1,542
400	551	772	527	626	836	372	360	1,329	1,565
500	699	994	666	795	1070	465	458	1,343	1,59
600	850	1225	804	969	1310	557	560	1,356	1,615
700	1004	1462	948	1149	1550	650	662	1,371	1,641
800	1160	1705	1094	1334	1800	743	767	1,384	1,688
900	1318	1952	1242	1526	2050	834	874	1,398	1,696
1000	1477	2204	1392	1723	2305	928	984	1,41	1,723
1500	2294	3504	2166	2779	3590	1390	1758	1,455	1,853
2000	3138	4844	2965	3926	4890	1855	2512	1,5	1,963
2500	4007	6203	3779	5132	6200	2320		1,53	2,053

Tab. 3-2

t [°C]	I <sub>spmin</sub> [kJ/kg]	c [kJ/m <sup>3</sup> K]	I <sub>vzmin</sub> [kJ/kg]	I <sub>sp</sub> [kJ/kg]				
				α=1,15	α=1,17	α=1,19	α=1,23	α=1,28
100	1008,2	1,3296	912,5	1145,0	1163,3	1181,5	1218,0	1263,7
200	2040,0	1,3369	1835,0	2315,3	2352,0	2388,6	2462,2	2553,8
300	3104,3	1,3473	2773,9	3520,4	3575,9	3631,3	3742,3	3881,0
400	4201,0	1,3597	3732,7	4760,9	4835,6	4910,2	5059,5	5246,2
500	5334,1	1,3742	4715,6	6041,4	6135,7	6230,0	6418,7	6654,4
600	6476,0	1,3877	5714,2	7333,1	7447,4	7561,7	7790,3	8076,0
700	7661,4	1,4032	6741,1	8672,5	8807,3	8942,2	9211,8	9548,9
800	8868,0	1,4172	7780,6	10035,1	10190,7	10346,3	10657,6	11046,6
900	10094,6	1,4313	8840,6	11420,7	11597,5	11774,3	12127,9	12570,0
1000	11341,4	1,4438	9908,9	12827,8	13025,9	13224,1	13620,5	14115,9
1500	17797,5	1,4914	15352,8	20100,4	20407,4	20714,5	21328,6	22096,2
2000	24493,8	1,5386	21117,8	27661,5	28083,8	28506,2	29350,9	30406,8
2500	31330	1,5703	26942,2	35372,1	35911,0	36449,8	37527,5	38874,6



Obr. 3-1 I-t diagram

## 4 TEPELNÁ BILANCE KOTLE

### 4.1 TEPLA PŘIVEDENÉ DO KOTLE

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{vzv} + Q_{pr} \quad (4.1)$$

Fyzické teplo paliva  $i_p$  se počítá, v případě že není předeříváno cizím zdrojem, jen u paliv s obsahem vody

$$W_t^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (4.2)$$

$$W_t^r = 1,5 \% ; \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} = \frac{26665,5}{4,19} \cdot \frac{1}{150} = 42,43 \%$$

$$1,5 \% \neq 42,43\%$$

z čehož vyplývá, že  $i_p$  neuvažují.

Teplo ohřátí vzduchu  $Q_{vzv}$  se počítá, pokud je vzduch ohříván vnějším zdrojem mimo kotel (např. odběrovou parou).  $Q_{pr}$  je teplo přivedené do kotle při parním rozprašování mazutu.

Pro náš případ tedy platí, že teplo přivedené do kotle se rovná výhřevnosti paliva.

$$Q_p^p = 26665,5 \frac{kJ}{kg}$$

### 4.2 ZTRÁTY KOTLE A TEPELNÁ ÚČINNOST

**Ztráta hořlavinou ve spalinách** (chemický nedopal)  $z_{CO} = 0,4 \%$  a určí se z tabulky (6-1) v [1] na str. 61.

**Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích** (mechanický nedopal) se vypočte podle

$$z_c = z_{cs} + z_{cú} \quad (4.3)$$

kde  $z_{cs}$  je ztráta v tuhých zbytcích zachycených v ohništi,  $z_{cú}$  je ztráta v tuhých zbytcích odcházejících z kotelního zařízení

$$z_{cs} = \frac{c_s}{100 - c_s} \cdot \frac{X_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cs} \quad (4.4)$$

$$z_{cs} = \frac{5}{100 - 5} \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{19,45}{26665,5} \cdot 32600 = 0,125 \%$$

$$z_{cú} = \frac{c_{ú}}{100 - c_{ú}} \cdot \frac{X_{ú}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cú} \quad (4.5)$$

$$z_{cú} = \frac{25 - 0,5 \cdot 32}{100 - (25 - 0,5 \cdot 32)} \cdot \frac{87}{100} \cdot \frac{19,45}{26665,5} \cdot 32600 = 2,046 \%$$

$$z_c = 0,125 + 2,046 = 2,171 \%$$

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků** u práškových ohnišť lze určit ze vzorce

$$z_f = \left( \frac{X_s}{100 - c_s} \cdot i_s + \frac{X_{\dot{u}}}{100 - c_{\dot{u}}} \cdot i_{\dot{u}} \right) \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \quad (4.6)$$

kde  $i_s=560$  kJ/kg pro  $t_s=600$  °C,  $i_{\dot{u}}$  určeno z tabulky (3-6) v [1] na str. 25 pomocí lineární interpolace pro teplotu 141 °C

$$z_f = \left( \frac{10}{100 - 5} \cdot 560 + \frac{87}{100 - 9} \cdot 117 \right) \cdot \frac{19,45}{26665,5} = 0,125 \%$$

**Ztráta sdílením tepla do okolí**  $z_{so} = 0,65 \%$  a určí se z obrázku (6-1) v [1] na str. 63.

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

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (\vartheta_k - t_{vz})}{Q_p^p} \quad (4.7)$$

kde  $t_{vz}=30$  °C je teplota nasávaného vzduchu a  $\vartheta_k=141$  °C je teplota spalin za kotlem. Měrné teplo spalin se určí z následujícího vztahu:

$$c_{sp} = \frac{I_{sp}}{O_{sp} \cdot \vartheta_k} = \frac{1792,6}{9,2534 \cdot 141} = 1,3739 \frac{kJ}{m^3K} \quad (4.8)$$

kde  $I_{sp}$  je entalpie spalin za kotlem při přebytku vzduchu  $\alpha=1,28$  a určí se z I-t diagramu;  $O_{sp}$  je objem spalin za kotlem při přebytku vzduchu  $\alpha=1,28$  a určí se z následujícího vzorce:

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = 7,2938 + (1,28 - 1) \cdot 6,9983 \quad (4.9)$$

$$O_{sp} = 9,2534 \frac{m^3}{kg}$$

$$z_k = (100 - 2,171) \cdot \frac{9,2534 \cdot 1,3739 \cdot (141 - 30)}{26665,5} = 5,177 \%$$

**Tepelná účinnost kotle** se stanoví ze vzorce:

$$\eta_k = 100 - \sum z = 100 - 0,4 - 2,171 - 0,125 - 0,65 - 5,177 = 91,48 \% \quad (4.10)$$

### 4.3 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY A MNOŽSTVÍ PALIVA

**Výrobní teplo páry**

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 30 \cdot (3483,1 - 724,6) = 82755,3 \text{ kW} \quad (4.11)$$

kde  $M_{pp}$ [kg/s] je navrhnutý parní výkon kotle,  $i_{pp}$  [kJ/kg] – entalpie přehřáté páry,  $i_{nv}$  [kJ/kg] – entalpie napájecí vody.

**Množství paliva přivedeného do kotle**

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{82755,3}{26665,5 \cdot \frac{91,48}{100}} = 3,393 \frac{kg}{s} \quad (4.12)$$

**Množství paliva skutečně spálené (výpočtové)**

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 3,393 \cdot \left(1 - \frac{2,171}{100}\right) = 3,319 \frac{kg}{s} \quad (4.13)$$

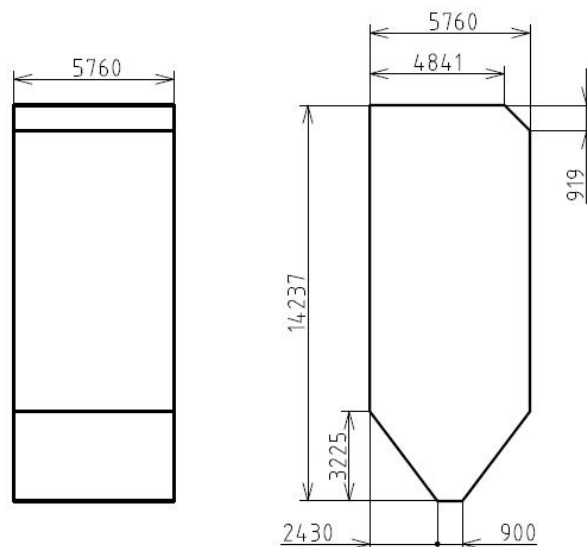
**5 NÁVRH SPALOVACÍ KOMORY**

Spalovací komora se skládá z membránových stěn s trubkami o průměru 60,3 mm. Rozteč trubek membránové stěny je 80 mm. Spalovací komora má čtvercový průřez 5760x5760 mm. Ve spodní části spalovací komory je umístěna výsypka popílku.

V rozích v dolní části ohniště se nachází 4 bloky nízkoemisních práškových hořáků. Každý hořákový blok se skládá z 2 hořáků na uhlí a 1 hořáku zapalovacího a stabilizačního na zemní plyn, jenž se nachází mezi dvěma uhelnými hořáky. Hořáky jsou v bloku umístěny nad sebou. Hořáky jsou umístěny tak, aby plamen směřoval tangenciálně do středu spalovací komory. Primární směs se do každého hořáku dopravuje samostatným potrubím, což umožňuje vypnutí nebo zapnutí jednotlivých hořáku podle potřeby.

V čelní stěně ohniště jsou 2 brýdové hořáky, do kterých jsou zavedeny brýdy z odlučovače uhelného prášku a sekundární vzduch. Dále jsou pro účel zapálení kotle a stabilizace ve spalovací komoře umístěny zapalovací hořáky na LTO.

Při návrhu spalovací komory bylo využito primárních opatření snižování emisí NO<sub>x</sub>. Spalování v rohových hořácích probíhá s mírnou podstechiometrií ( $\alpha=0,9$ ). Hořáky mají odstupňovaný přívod vzduchu. Zbytek spalovacího vzduchu je zaveden v horní části spalovací komory v oblasti 2 až 3 metry pod hranicí konce spalovací komory (dohořivací vzduch). Dýzy jsou umístěny tak, aby bylo zajištěno optimální rozmístění vzduchu a pokrytí provozního výkonového pásu kotle.



Obr. 5-1 Spalovací komora

**Průřezové zatížení ohniště**

$$q_f = 2730 \frac{kW}{m^2} \quad (5.1)$$

kde hodnota  $q_v$  zvolena podle tabulky (7-8) v [1] na str. 70

**Průřez ohniště**

$$f = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{q_f} = \frac{3,393 \cdot 26665,5}{2730} = 33,14 m^2 \quad (5.2)$$

**5.1 VÝPOČET KONSTRUKČNÍCH ROZMĚRŮ****Vypočítaný reálný aktivní objem spalovací komory**

$$V_{o\ real} = 405,153 m^3 \quad (5.3)$$

**Vypočítaný reálný průřez spalovací komory**

$$f_{real} = a \cdot b = 5,76 \cdot 5,76 = 33,18 m^2 \quad (5.4)$$

**Celkový povrch stěn ohniště**

$$F_{st} = 340,05 m^2 \quad (5.5)$$

**Účinná sálavá plocha stěn ohniště**

$$\begin{aligned} F_{\dot{u}s} &= \sum F_i \cdot x_i - F_{hořáky} = \\ &= 350,96 - [4 \cdot (0,6 \cdot 3) - 7] = 336,76 m^2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

kde  $x_i$  je úhlový součinitel i-té části trubkové stěny ( $x=1$  pro membránové stěny a pro plochy kotlového svazu, mříže a deskového přehříváku ve výstupním průřezu ohniště); odečtené plochy: 4 práškové hořáky  $4 \cdot (0,6 \cdot 3) m^2$ , ostatní plochy nepřebírající teplo  $7 m^2$  (zapalovací hořáky, brýdové hořáky, kontrolní vlezky, průhledítka, OFA dýzy)

**5.2 TEPELNÝ VÝPOČET OHNIŠTĚ****Součinitel M**

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_0 \quad (5.7)$$

kde  $x_0$  je poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene. U práškových ohnišť s horizontálním uspořádáním hořáků a vertikálním prouděním spalin se hodnota  $x_0$  z poměrné výšky hořáků  $x_0 = x_h$ , kde  $x_h = h_h/h_c$ . Po odborné konzultaci byla hodnota  $h_h$  stanovena na 5450 mm.

$$x_0 = x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{5450}{12625} = 0,4317 \quad (5.8)$$

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot 0,4317 = 0,3742$$

**Boltzmannovo číslo**

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot C}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot F_{st} \cdot T_a^3} \quad (5.9)$$

kde  $\varphi$  - součinitel uchování tepla podle rovnice (5.10),  $\overline{O_{sp} \cdot C}$  - střední celkové měrné teplo spalin podle rovnice (5.11);  $\bar{\psi}$  - součinitel tepelné efektivity stěn podle rovnice (5.15),  $T_a$  - teoretická teplota plamene.

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,65}{91,48 + 0,65} = 0,993 \quad (5.10)$$

$$\overline{O_{sp} \cdot C} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} \quad (5.11)$$

kde  $I_u$  [kJ/kg] - teplo uvolněné ve spalovací komoře podle rovnice (5.12) a jemu odpovídající adiabatická teplota plamene  $\vartheta_a$  z I-t diagram spalin pro přebytek vzduchu na výstupu z ohniště  $\alpha_0$ ,  $I_0$  [kJ/kg] - entalpie spalin na výstupu z ohniště,  $\vartheta_0$  [°C] - teplota spalin na výstupu z ohniště.

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{co} - z_c - z_{fs}}{100 - z_{co}} + Q_{vz} \quad (5.12)$$

kde  $z_{fs}$  [%] - ztráta fyzickým teplem škváry se určí podle vzorce (5.13),  $Q_{vz}$  [kJ/kg] - teplo přivedené do kotle se vzduchem se určí podle vztahu (5.14)

$$z_{fs} = \frac{X_i}{100 - c_i} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_s \cdot t_s = \frac{10}{100 - 5} \cdot \frac{19,45}{26665,5} \cdot 0,934 \cdot 600 = 0,041 \% \quad (5.13)$$

kde  $c_s$  - měrné teplo škváry,  $t_s$  - teplota škváry

$$Q_{vz} = (\alpha_0 - \Delta\alpha_0) \cdot I''_{vzmin} + (\Delta\alpha_0) \cdot I'_{vzmin} \quad (5.14)$$

kde  $I''_{vzmin}$  [kJ/kg] - entalpie minimálního množství horkého vzduchu (teplota horkého vzduchu 200°C),  $I'_{vzmin}$  [kJ/kg] - entalpie nasávaného studeného vzduchu (teplota nasávaného studeného vzduchu 30°C), entalpie se určí z I-t diagramu.

$$Q_{vz} = (1,15 - 0,05) \cdot 1835,0 + (0,05) \cdot 273,3 = 2032,1 \frac{kJ}{kg}$$

$$I_u = 26665,5 \cdot \frac{100 - 0,4 - 2,171 - 0,041}{100 - 2,171} + 2032,1 = 28577,52 \frac{kJ}{kg}$$

Entalpie spalin na výstupu z ohniště  $I_0 = 16457,20$  kJ/kg byla určena pomocí lin. interpolace z tabulky 3.2 pro teplotu spalin  $\vartheta_0 = 1249,53$  °C. Teplota  $\vartheta_a = 2059,4$  °C je určena pomocí lin. interpolace z tabulky 3.2 a odpovídá teplu  $I_u$  uvolněnému ve spalovací komoře (v tabulce sloupec  $I_{sp}$  pro  $\alpha = 1,15$ ).

$$\overline{O_{sp} \cdot C} = \frac{28577,5 - 16457,20}{2059,4 - 1249,53} = 14,966 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$



$$\bar{\psi} = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,45 = 0,45 \quad (5.15)$$

pokud mají stěny stejné hodnoty úhlového součinitele  $x$  a součinitele zanášení  $\xi$ . Součinitel zanášení  $\xi=0,45$  a určí se pomocí tabulky (7-11) v [1] na str. 80.

$$B_0 = \frac{0,993 \cdot 3,319 \cdot 14,966}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 340,05 \cdot (2059,4 + 273,15)^3} = 0,446966$$

### Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \bar{\psi}} \quad (5.16)$$

kde  $a_{pl}$  je efektivní stupeň černosti plamene a pro spalování tuhých paliv se určí podle následujícího vztahu

$$a_{pl} = 1 - e^{-kps} \quad (5.17)$$

kde  $k$  – součinitel zeslabení sálání podle rovnice (5.19),  $p$  [MPa] – tlak v ohništi (u kotlů bez přetlaku v ohništi se bere jako 0,1 MPa,  $s$  [m] – účinná tloušťka sálové vrstvy podle rovnice (5.18):

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_{0\,real}}{F_{st}} = \frac{405,153}{340,05} = 4,2892 \, m \quad (5.18)$$

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (5.19)$$

Součinitel zeslabení sálání  $k$  se skládá ze součinitele zeslabení sálání tříatomových plynů podle vzorce (5.20), součinitele zeslabení sálání popílkem podle vzorce (5.22) a ze součinitele zeslabení sálání koksovými částicemi.

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (5.20)$$

kde  $p_{sp}$  je celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2259 = 0,0226 \quad (5.21)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 4,2892}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{1249,53 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2259 = 0,806136 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (5.22)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(1249,53 + 273,15)^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,1915 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Hodnota součinitele zeslabení sálání koksovými částicemi  $k_k=1$ . Hodnota  $\kappa_1=0,5$  a  $\kappa_2=0,1$  (hodnoty určeny podle [1] na str. 82).

$$k = 0,806136 + 1,1915 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 2,4976 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$a_{pl} = 1 - e^{-2,4976 \cdot 0,1 \cdot 4,2892} = 0,6574$$

$$a_0 = \frac{0,6574}{0,6574 + (1 - 0,6574) \cdot 0,45} = 0,803272$$

### Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (5.23)$$

$$\vartheta_o = \frac{2059,4 + 273,15}{1 + 0,3742 \cdot \left(\frac{0,803272}{0,446966}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1249,53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) \quad (5.24)$$

$$Q_s = 0,993 \cdot (28577,52 - 16457,20) = 12034,80 \frac{kJ}{kg}$$

### Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_o)}{F_{\dot{u}s}} \quad (5.25)$$

$$\bar{q} = \frac{0,993 \cdot 3,319 \cdot (28577,52 - 16457,20)}{336,76} = 119,2 \frac{kW}{m^2}$$

## 6 NÁVRH TEPLOSMĚNNÝCH PLOCH

Sytá pára z bubnu je odváděna do přehříváku, který je rozdělen na 4 části jdoucí sériově za sebou. Zapojení přehříváků je následující:

- Přehřívák 1 (PP1) – stropní přehřívák – sestává z membránové stěny na stropě kotle, která končí před obratovou komorou. Dále pokračuje jako membránové stěny po bocích horizontálního tahu.
- Přehřívák 2 (PP2) – konvekční přehřívák – protiproudý přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek, který se nachází v horizontálním tahu
- Přehřívák 3 (PP3) – deskový přehřívák – polosálavý přehřívák umístěný za koncem ohniště
- Přehřívák 4 (PP4) – výstupní přehřívák – souproudý přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek, který se dispozičně nachází za PP3 a před mříží

Regulace teploty přehřáté páry se provádí vstřikem napájecí vody, která je odebírána před ekonomizérem. První vstřík (4 % z napájecí vody) se zavádí před deskový

přehřívák (PP3). Druhý vstřík (taktěž 4 % z napájecí vody) se zavádí před výstupní přehřívák (PP4).

Druhý díl ekonomizéru je proveden jako protiproudý výměník s hustým a vystřídáním uspořádáním trubek. První díl ekonomizéru je taktěž proveden jako protiproudý výměník s hustým a vystřídáním uspořádáním trubek. Nedohřev mezi výstupem z ekonomizéru a výparníkem je 52 °C.

Spalovací vzduch se ohřívá v jednostupňovém dvoudílném trubkovém ohříváku vzduchu. Za výstupem z ohříváku je vzduch rozdělen do jednotlivých potrubí pro práškové hořáky, plynové hořáky a dýzy dohořivacího vzduchu

Poznámka: hodnoty uvedené v tabulkách níže pro navrhované tlakové ztráty, přísávání falešného vzduchu a množství vstříku byly voleny dle doporučení v [1].

Tab. 6-1

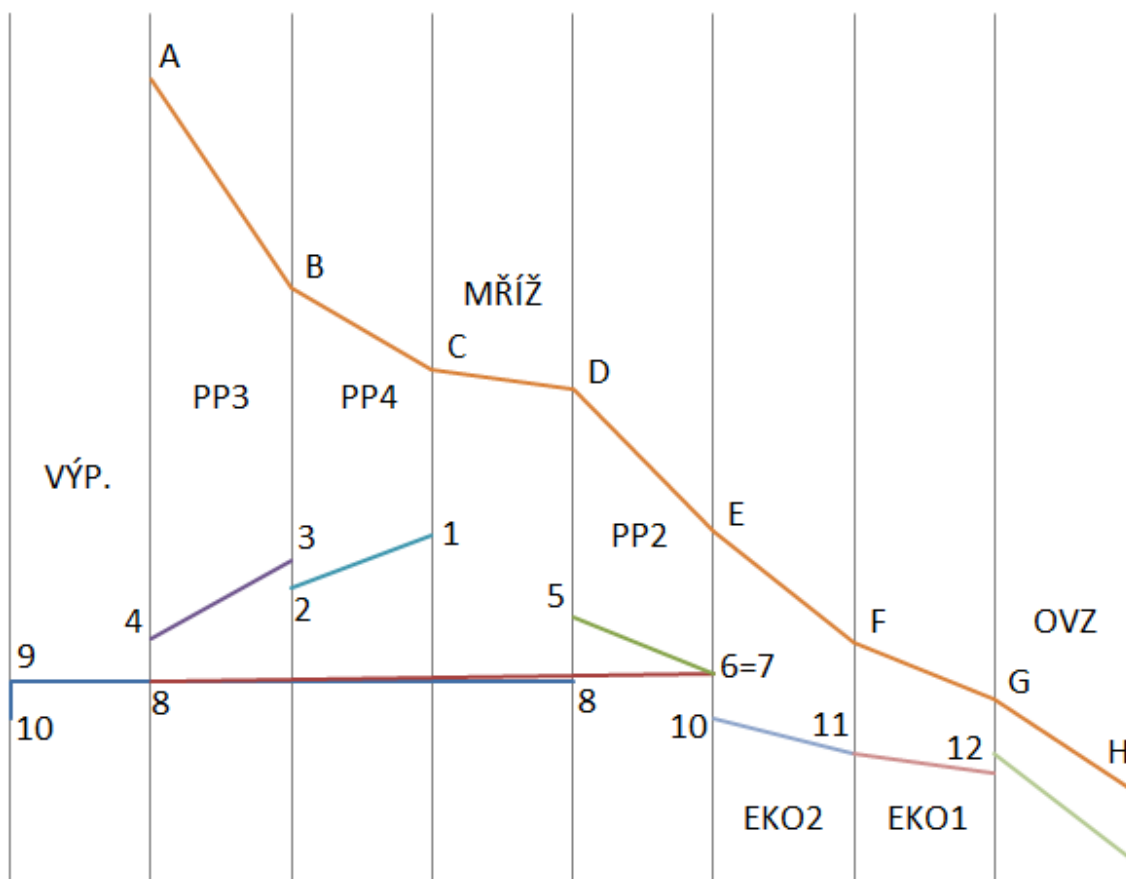
Návrh tlakových ztrát	[MPa]	Návrh součinitele $\alpha$	[-]
PP4	0,2	za ohništěm	1,15
PP3	0,2	za PP3	1,15
PP2	0,2	za PP4	1,17
PP1	0,2	za mříží	1,19
EKO	0,3	za PP2	1,19
celkem	1,1	za EKO	1,23
Návrh vstříků	[kg/s]	za OVZ	1,27
$M_{vs1}=M_{vs2}$	1,2	na konci kotle	1,28

Tab. 6-2

Průběh charakteristických veličin páry		tlak		entalpie	teplota	měr. obj.
		[MPa]	[bar]	[kJ/kg]	[°C]	[m <sup>3</sup> /kg]
1	PP4 <sub>OUT</sub>	9,4	94	3483,10	540,0	0,037500
2	PP4 <sub>IN</sub>	9,6	96	3273,10	459,1	0,031775
3	PP3 <sub>OUT</sub>	9,6	96	3379,29	499,7	0,034291
4	PP3 <sub>IN</sub>	9,8	98	3039,29	380,3	0,025614
5	PP2 <sub>OUT</sub>	9,8	98	3139,93	412,7	0,027991
6	PP2 <sub>IN</sub>	10	100	2799,93	323,1	0,019652
7	PP1 <sub>OUT</sub>	10	100	2799,93	323,1	0,019652
8	PP1 <sub>IN</sub> =VÝP <sub>OUT</sub>	10,2	102	2721,83	312,5	0,017596
9	zač. vypařování	10,2	102	1416,48	312,5	0,001460
10	EKO2 <sub>out</sub> =V <sub>IN</sub>	10,2	102	1136,47	260,5	0,001266
11	EKO2 <sub>IN</sub> =EKO1 <sub>out</sub>	10,35	103,5	864,00	201,8	0,001151
12	EKO1 <sub>IN</sub>	10,5	105	724,59	170,0	0,001107

Tab. 6-3

Průběh charakteristických veličin spalin		entalpie [kJ/kg]	teplota [°C]
A	za ohništěm	16457,21	1249,5
B	za PP3 (desk)	11895,71	933,8
C	za PP4 (výst)	10346,43	811,1
D	za mříží	9962,25	783,5
E	za PP2 (konv)	7019,40	559,3
F	za EKO2	4742,96	381,4
G	za EKO1	3580,88	287,4
H	za OVZ	1798,84	141,5



Obr. 6-1 Pilový diagram

**TEPELNÝ VÝKON****Přehřívák páry 4**

$$Q_{PP4} = M_{PP4} \cdot (I_{PP4}^{OUT} - I_{PP4}^{IN}) \quad (6.1)$$

$$Q_{PP4} = 30 \cdot (3483,10 - 3273,10) = 6300 \text{ kW}$$

**Přehřívák páry 3**

$$Q_{PP3} = M_{PP3} \cdot (I_{PP3}^{OUT} - I_{PP3}^{IN}) \quad (6.2)$$

$$Q_{PP3} = (M_{PP4} - M_{vs2}) \cdot (I_{PP3}^{OUT} - I_{PP3}^{IN})$$

$$Q_{PP3} = (30 - 1,2) \cdot (3379,29 - 3039,29) = 9792 \text{ kW}$$

**Přehřívák páry 2**

$$Q_{PP2} = M_{PP2} \cdot (I_{PP2}^{OUT} - I_{PP2}^{IN}) \quad (6.3)$$

$$Q_{PP2} = (M_{PP4} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (I_{PP2}^{OUT} - I_{PP2}^{IN})$$

$$Q_{PP2} = (30 - 1,2 - 1,2) \cdot (3139,93 - 2799,93) = 9384 \text{ kW}$$

**Přehřívák páry 1**

$$Q_{PP1} = M_{PP1} \cdot (I_{PP1}^{OUT} - I_{PP1}^{IN}) \quad (6.4)$$

$$Q_{PP1} = (M_{PP4} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (I_{PP1}^{OUT} - I_{PP1}^{IN})$$

$$Q_{PP1} = (30 - 1,2 - 1,2) \cdot (2799,893 - 2721,83) = 2155,56 \text{ kW}$$

**Výparník**

$$Q_{výp} = M_{výp} \cdot (I_{výp}^{OUT} - I_{výp}^{IN}) \quad (6.5)$$

$$Q_{výp} = (M_{PP4} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (I_{výp}^{OUT} - I_{výp}^{IN})$$

$$Q_{výp} = (30 - 1,2 - 1,2) \cdot (2721,83 - 1136,47) = 43755,94 \text{ kW}$$

**Ekonomizér**

$$Q_{eko} = Q_{eko2} + Q_{eko1} \quad (6.6)$$

$$Q_{eko2} = M_{eko2} \cdot (I_{eko2}^{OUT} - I_{eko2}^{IN}) \quad (6.7)$$

$$Q_{eko2} = (M_{PP4} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (I_{eko2}^{OUT} - I_{eko2}^{IN})$$

$$Q_{eko2} = (30 - 1,2 - 1,2) \cdot (1136,47 - 864) = 7520,10 \text{ kW}$$

$$Q_{eko1} = M_{eko1} \cdot (I_{eko1}^{OUT} - I_{eko1}^{IN}) \quad (6.8)$$

$$Q_{eko1} = (M_{PP4} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (I_{eko1}^{OUT} - I_{eko1}^{IN})$$

$$Q_{eko1} = (30 - 1,2 - 1,2) \cdot (864 - 724,59) = 3847,70 \text{ kW}$$

$$Q_{eko} = 7520,10 + 3847,70 = 11367,80 \text{ kW}$$

### Ohřívák vzduchu

$$Q_{ovz} = M_{pv} \cdot (\beta''_{ovz} + \Delta\alpha_{ovz}) \cdot (I''_{vzmin} - I'_{vzmin}) \quad (6.9)$$

$$Q_{ovz} = 3,319 \cdot (1,1 + 0,04) \cdot (1834,98 - 273,29) = 5908,82 \text{ kW}$$

### Celkový tepelný výkon

$$Q_{celk} = Q_{PP4} + Q_{PP3} + Q_{PP2} + Q_{PP1} + Q_{výp} + Q_{eko} \quad (6.10)$$

$$Q_{celk} = 6300 + 9792 + 9384 + 2155,56 + 43755,94 + 11367,80$$

$$Q_{celk} = 82755,31 \text{ kW}$$

## 7 PP3 A DOPLŇKOVÉ PLOCHY

### SÁLAVÉ TEPLŮ Z OHNIŠTĚ

#### Hustota tepelného toku procházející výstupním průřezem ohniště

$$q_0 = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} = 0,93 \cdot 0,65 \cdot 118,6 = 71,7 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (7.1)$$

kde  $\delta$  představuje podíl tepelného toku výstupním průřezem a tepelného toku do stěn v místě výstupního průřezu (odečte se z obr. 9-3 na str. 144 v [1]),  $y_h$  – součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště (určí se z tabulky 7-14 na str. 86 v [1] pro výstupní průřez)

#### Hustota tepelného toku do stěn v místě výstupního průřezu z ohniště

$$q_m = y_h \cdot \bar{q} = 0,65 \cdot 118,6 = 77,1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (7.2)$$

#### Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku

$$q_{sv} = q_m \cdot \frac{F_0}{F_{sv}} \cdot (1 - a) \cdot \varphi_{0-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (7.3)$$

$$q_{sv} = 77,1 \cdot \frac{27,88}{35,24} \cdot (1 - 0,4126) \cdot 0,1658 +$$

$$+ 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,3952 \cdot \left(\frac{1364,8}{100}\right)^4$$

$$q_{sv} = 45,2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

kde  $F_0$  – výstupní průřez spalovací komory (vstupní průřez deskového přehříváku) [ $\text{m}^2$ ],  $F_{sv}$  – výstupní průřez deskového přehříváku (vstupní dalšího svazku) [ $\text{m}^2$ ],  $a$  – stupeň černosti prostředí,  $\psi_{sv}$  – součinitel tepelné efektivity svazku (=0,5 při spalování uhlí)

podle [1]),  $T$  – střední teplota spalin v prostoru deskového přehříváku [K].  $\varphi_{0-sv}$  – úhlový součinitel ohniště – svazek se určí z následujícího vzorce:

$$\varphi_{0-sv} = \sqrt{\left(\frac{c}{b}\right)^2 + 1} - \frac{c}{b} = \sqrt{\left(\frac{2,112}{0,72}\right)^2 + 1} - \frac{2,112}{0,72} = 0,1658 \quad (7.4)$$

kde  $b$  – vzdálenost mezi deskami (příčná rozteč) [m],  $c$  – hloubka deskového přehříváku ve směru proudu spalin [m]

$$F_0 = 4,841 \cdot 5,76 = 27,88 \text{ m}^2 \quad (7.5)$$

$$F_{sv} = 6,1189 \cdot 5,76 = 35,24 \text{ m}^2 \quad (7.6)$$

**Sálavé teplo z ohniště a z prostoru deskového přehříváku zachycené v prostoru deskového přehříváku**

$$Q_s^{prostor PP3} = \frac{q_0 \cdot F_0 - q_{sv} \cdot F_{sv}}{M_{pv}} = \frac{71,7 \cdot 27,88 - 45,2 \cdot 35,24}{3,319} \quad (7.7)$$

$$Q_s^{prostor PP3} = 122,50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**Rozdělení sálavého tepla**

$$S_{PP3} = 134,02 \text{ m}^2; S_{PP1-1} = 27,88 \text{ m}^2; S_{výp-dp} = 94,49 \text{ m}^2$$

$$S_d = S_{PP1-1} + S_{výp-dp} \quad (7.8)$$

$$S_d = 27,88 + 94,49 = 122,37 \text{ m}^2;$$

$$Q_s^{PP3} = \frac{S_{PP3}}{S_{PP3} + S_d} \cdot Q_s^{prostor PP3} = \frac{134,02}{134,02 + 122,37} \cdot 122,50 = 64,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.9)$$

$$Q_s^{PP1-1} = \frac{S_{PP1-1}}{S_{PP3} + S_d} \cdot Q_s^{pr PP3} = \frac{27,88}{134,02 + 122,37} \cdot 122,50 = 13,32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.10)$$

$$Q_s^{výp-dp} = \frac{S_{výp-dp}}{S_{PP3} + S_d} \cdot Q_s^{pr PP3} = \frac{94,49}{134,02 + 122,37} \cdot 122,50 = 45,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.11)$$

$$Q_{s,celk} = Q_s^{PP3} + Q_s^{PP1-1} + Q_s^{výp-dp} \quad (7.12)$$

$$Q_{s,celk} = 64,03 + 13,32 + 45,14 = 122,37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_A - I_B + \Delta I) + Q_{s,celk} \quad (7.13)$$

kde  $\Delta I$  je množství tepla s přisávaným falešným vzduchem a určí se ze vztahu (7.14)

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0 \frac{kJ}{kg} \quad (7.14)$$

kde  $\Delta \alpha$  – zvětšení přebytku vzduchu v počítané výhřevné ploše,  $I_{vzmin}$  – entalpie min. mn. vzduchu (určí se z I-t diagram v závislosti na teplotě)

$$Q_b = 0,993 \cdot (16457,21 - 11895,71 + 0) + 122,37 = 4651,82 \frac{kJ}{kg}$$

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ PÁRY

$$Q_b^{PP3} = \frac{M_{PP3}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP3}^{OUT} - I_{PP3}^{IN}) \quad (7.15)$$

$$Q_b^{PP3} = \frac{28,8}{3,319} \cdot (3379,29 - 3039,29) = 2950,32 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{PP1-1} = \frac{M_{PP1-1}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP1-1}^{OUT} - I_{PP1-1}^{IN}) \quad (7.16)$$

$$Q_b^{PP1-1} = \frac{27,6}{3,319} \cdot (2784,20 - 2721,83) = 518,69 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{výp-dp} = 1182,81 \frac{kJ}{kg} \quad (7.17)$$

$$Q_b = Q_b^{PP4} + Q_b^{PP1-1} + Q_b^{výp-dp} \quad (7.18)$$

$$Q_b = 2950,32 + 518,69 + 1182,81 = 4651,82 \frac{kJ}{kg}$$

## 7.1 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 3

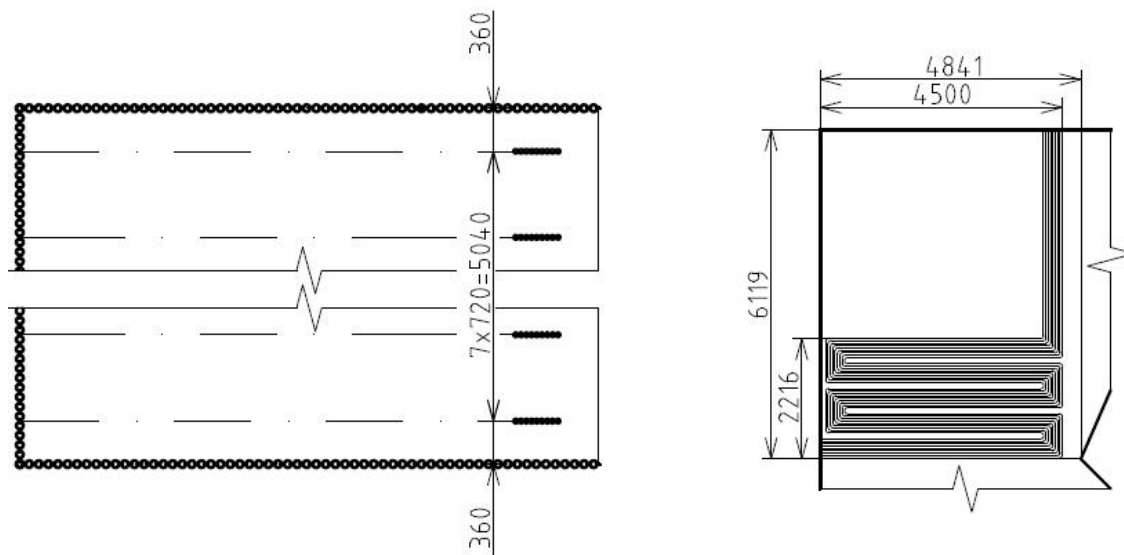
Tab. 7-1

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP3}^{IN}$	380,3	$I_{PP3}^{IN}$	3039,29	$p_{PP3}^{IN}$	9,8	$v_{PP3}^{IN}$	0,025614
výstupní parametry páry	$t_{PP3}^{OUT}$	499,7	$I_{PP3}^{OUT}$	3379,29	$p_{PP3}^{OUT}$	9,6	$v_{PP3}^{OUT}$	0,034291
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	1249,5	$I_A$	16457,2				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	933,8	$I_B$	11895,7				



Tab. 7-2

vnější průměr trubky	$D$	38 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	26,8 mm
délka trubek	$l$	4841 mm
příčná rozteč	$s_1$	720 mm
podélná rozteč	$s_2$	44 mm
počet trubek v 1 desce	$n_{tr}$	9
počet desek	$n_d$	8
celkový počet trubek	$n$	72
plocha 1 desky	$S_{1d}$	18,61 m <sup>2</sup>



Obr. 7-1 Přejhřívák 3

### Celková plocha desek

$$S = x \cdot n_d \cdot S_{1d} = 0,9 \cdot 8 \cdot 18,61 = 134,02 \text{ m}^2 \quad (7.19)$$

kde  $x$  je =uhlový součinitel desek [-], určí se v [1] z obr. 7-2a, křivka č. 5, pro podélnou rozteč trubek

### Kontrola šířky

$$1 \cdot s_1 + (n_d - 1) \cdot s_1 = 1 \cdot 720 + (8 - 1) \cdot 720 = 5760 \text{ mm} \quad (7.20)$$

$$5760 \text{ mm} = 5760 \text{ mm}$$

### Střední teplota páry

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP3}^{IN} + t_{PP3}^{OUT}}{2} = \frac{380,3 + 499,7}{2} = 440,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.21)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP3}^{IN} + v_{PP3}^{OUT}}{2} = \frac{0,025614 + 0,034291}{2} = 0,029952 \frac{m^3}{kg} \quad (7.22)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{1249,5 + 933,8}{2} = 1091,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.23)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (7.24)$$

kde  $O_{sp}$  – objem spalin v daném místě [ $m^3/kg$ ],  $F_{sp}$  – průřez pro spaliny [ $m^2$ ]

$$F_1 = b \cdot x_1 - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 4,841 - 8 \cdot \frac{38}{1000} \cdot 4,5 = 26,52 \text{ } m^2 \quad (7.25)$$

$$F_2 = b \cdot x_2 - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 6,1189 - 8 \cdot \frac{38}{1000} \cdot 6,1 = 33,39 \text{ } m^2 \quad (7.26)$$

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 26,52 \cdot 33,39}{26,52 + 33,39} = 29,56 \quad (7.27)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,34}{29,56} \cdot \left(1 + \frac{1091,6}{273}\right) = 4,68 \frac{m}{s}$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP3}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP3} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 28,8 \cdot 0,029952}{\pi \cdot \left(\frac{26,8}{1000}\right)^2 \cdot 72} = 21,24 \frac{m}{s} \quad (7.28)$$

kde  $v$  – střední měrný objem páry [ $m^3/kg$ ],  $F_p$  – průřez pro páru [ $m^2$ ]

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = 0,02 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.29)$$

kde  $c_s$  – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a poměrné podélné rozteči,  $c_z$  – oprava na počet podélných řad. Vlastnosti spalin určeny z tabulek (3-3), (3-4) a (3-5) v [1] pro střední teplotu spalin.  $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [W/mK],  $\nu$  – součinitel kinematické viskozity [ $m^2/s$ ], Pr – Prandtlovo číslo [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{720}{38} = 18,94 \quad (7.30)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{44}{38} = 1,16 \quad (7.31)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (7.32)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,16}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,668$$

poznámka – při  $\sigma_2 < 2$  a  $\sigma_1 > 3$  se do vzorce dosazuje  $\sigma_1 = 3$

$$c_z = 1$$

$$\lambda = 0,1123 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0,0001925 \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0,56$$

$$\alpha_k = 0,02 \cdot 0,668 \cdot 1 \cdot \frac{0,1123}{38} \cdot \left( \frac{4,68 \cdot \frac{38}{1000}}{0,0001925} \right)^{0,65} \cdot 0,56^{0,33} = 27,6 \frac{W}{m^2K}$$

### SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY

$$\alpha_K = c_d \cdot \alpha_N = 1,01 \cdot 2800 = 2828 \frac{W}{m^2K} \quad (7.33)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-8 na str. 110 v [1]

### SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.34)$$

kde  $a_{st}$  – stupeň černosti povrchu stěn (uvažuje se  $a_{st}=0,8$ ),  $a$  – stupeň černosti proudu spalin,  $T_z$  – absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn [K],  $T$  – absolutní teplota proudu spalin [K]

### Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (7.35)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (7.36)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{170,62}{185,50 + 148,91} = 1,8368 \text{ m} \quad (7.37)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7.38)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 1,8368}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1364,8}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,4558 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (7.39)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1364,8^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,2816 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (1,4558 + 1,2816) \cdot 0,1 \cdot 1,9794 = 0,5028$$

$$a = 1 - e^{-0,5028} = 0,3952$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (7.40)$$

kde  $t$  – střední teplota média v trubkách [ $^{\circ}C$ ],  $\varepsilon$  – součinitel zanesení [ $m^2K/W$ ] podle [1]

$$t_z = 440,0 + \left( 0,01 + \frac{1}{2703} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot (2950,32 + 64,03)}{134,02} \cdot 10^{-3}$$

$$t_z = 1212,9 \text{ } ^{\circ}C$$

$$T_z = 1486,1 \text{ } K$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3952 \cdot 1364,8^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{1486,1}{1364,8} \right)^4}{1 - \frac{1486,1}{1364,8}} = 235,3 \frac{W}{mK}$$

### SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (27,6 + 235,3) = 262,9 \frac{W}{m^2K} \quad (7.41)$$

kde  $\omega$  – součinitel omývání desek u příčného proudění spalin, podle obr. 9-1 v [1]

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,48 \cdot \frac{1}{\frac{1}{262,9} + \frac{1}{2828}} = 115,4 \frac{W}{m^2K} \quad (7.42)$$

kde  $\psi$  – součinitel tepelné efektivity, podle [1]

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(1249,5 - 380,3) - (933,8 - 499,7)}{2,3 \cdot \log \frac{1249,5 - 380,3}{933,8 - 499,7}} = 627,3 \text{ } ^{\circ}C \quad (7.43)$$

## ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{PP3} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (7.44)$$

$$Q_k^{PP3} = \frac{115,4 \cdot 627,3 \cdot 134,02}{3,319} \cdot 10^{-3} = 2924,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## KONTROLA

$$\Delta Q = Q_k^{PP3} - Q_b^{PP3} = 2924,43 - 2950,32 = -25,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.45)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP3}} = \frac{-25,89}{2950,32} \cdot 100 = -0,88 \% \quad (7.46)$$

## 7.2 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 1 (1. ČÁST)

Tab. 7-3

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP1-1}^{IN}$	312,5	$I_{PP1-1}^{IN}$	2721,8	$p_{PP1-1}^{IN}$	10,2	$v_{PP1-1}^{IN}$	0,017596
výstupní parametry páry	$t_{PP1-1}^{OUT}$	321,2	$I_{PP1-1}^{OUT}$	2784,2	$p_{PP1-1}^{OUT}$	10,2	$v_{PP1-1}^{OUT}$	0,018922
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	1249,5	$I_A$	16457,2				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	933,8	$I_B$	11895,7				

Tab. 7-4

vnější průměr trubky	$D$	32 mm
tloušťka stěny	$s_r$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	20,8 mm
délka trubek	$l$	4841 mm
celkový počet trubek	$n$	70
příčná rozteč	$s_1$	80 mm

## Celková plocha

$$S = b \cdot l = 5,76 \cdot 4,841 = 27,88 \text{ m}^2 \quad (7.47)$$

## Střední teplota páry

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP1-1}^{IN} + t_{PP1-1}^{OUT}}{2} = \frac{312,5 + 321,2}{2} = 316,8 \text{ °C} \quad (7.48)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP1-1}^{IN} + v_{PP1-1}^{OUT}}{2} = \frac{0,017596 + 0,018922}{2} = 0,018259 \frac{m^3}{kg} \quad (7.49)$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP1}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP1} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,018259}{\pi \cdot \left(\frac{20,8}{1000}\right)^2 \cdot 70} = 21,19 \frac{m}{s} \quad (7.50)$$

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,73 \cdot 19 = 13,9 \frac{W}{m^2K} \quad (7.51)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (7.52)$$

kde  $c_t$  – opravný koeficient závisící na teplotě proudu a stěny,  $c_l$  – oprava na poměrnou délku,  $c_m$  – opravný koeficient pro jednostranný ohřev. Vlastnosti páry určeny z tabulky (3-9) v [1] pro střední teplotu páry.

$$\lambda = 0,0709 \frac{W}{mK}$$

$$\mu = 0,00002108 \frac{Ns}{m^2}$$

$$v = \mu \cdot w = 0,00002109 \cdot 0,018274 = 3,85 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (7.53)$$

$$Pr = 1,59$$

$$c_t = 1; c_l = 1; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0709}{\frac{20,8}{1000}} \cdot \left(\frac{21,19 \cdot \frac{20,8}{1000}}{3,85 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,59^{0,4} = 6635,9 \frac{W}{m^2K}$$

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.54)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (7.55)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (7.56)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{170,62}{185,50 + 148,91} = 1,8368 \text{ m} \quad (7.57)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7.58)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 1,8368}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1364,8}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,4558 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (7.59)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1364,8^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,2817 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k \cdot p \cdot s = (1,4558 + 1,2817) \cdot 0,1 \cdot 1,9794 = 0,5028$$

$$a = 1 - e^{-0,5028} = 0,3952$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (7.60)$$

$$t_z = 316,8 + \left( 0,0043 + \frac{1}{6635,9} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot (518,69 + 13,32)}{27,88} \cdot 10^{-3}$$

$$t_z = 598,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 871,8 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3952 \cdot 1364,8^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{871,8}{1364,8} \right)^4}{1 - \frac{871,8}{1364,8}} = 118,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (13,9 + 118,9) = 126,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (7.61)$$

kde  $\xi$  – součinitel využití, který charakterizuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou, podle [1]

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{126,1}{1 + \left(0,0043 + \frac{1}{6635,9}\right) \cdot 126,1} = 80,8 \frac{W}{m^2K} \quad (7.62)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(1249,5 - 312,5) - (933,8 - 321,2)}{2,3 \cdot \log \frac{1249,5 - 312,5}{933,8 - 321,2}} = 764,2^\circ C \quad (7.63)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{PP1-1} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (7.64)$$

$$Q_k^{PP1-1} = \frac{80,8 \cdot 764,2 \cdot 27,88}{3,319} \cdot 10^{-3} = 518,70 \frac{kJ}{kg}$$

### KONTROLA

$$\Delta Q = Q_k^{PP1-1} - Q_b^{PP1-1} = 518,70 - 518,69 = 0,01 \frac{kJ}{kg} \quad (7.65)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP1-1}} = \frac{0,01}{518,70} \cdot 100 = 0,00 \% \quad (7.66)$$

## 7.3 VÝPARNÍK (MEMBRÁNOVÉ STĚNY V OBLASTI PP3)

Tab. 7-5

vnější průměr trubky	$D$	60,3 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	49,1 mm

### Celková plocha

$$S = 2 \cdot (4,841 \cdot 6,1189) + 6,1189 \cdot 5,76 = 94,49 \text{ m}^2 \quad (7.67)$$

### SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,73 \cdot 16,5 = 12,0 \frac{W}{m^2K} \quad (7.68)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

### SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.69)$$



**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (7.70)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (7.71)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{170,62}{185,50 + 148,91} = 1,8368 \text{ m} \quad (7.72)$$

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

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 1,8368}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1364,8}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,4558 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (7.73)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1364,8^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,2817 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k \cdot p \cdot s = (1,4558 + 1,2817) \cdot 0,1 \cdot 1,8368 = 0,5028$$

$$a = 1 - e^{-0,5028} = 0,3952$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (7.74)$$

$$t_z = 312,5 + (0,0043 + 0) \cdot \frac{3,319 \cdot (1182,81 + 45,14)}{94,49} \cdot 10^{-3} = 497,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 771,1 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3952 \cdot 1364,8^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{771,1}{1364,8} \right)^4}{1 - \frac{771,1}{1364,8}} = 106,4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

**SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (12,0 + 106,4) = 112,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (7.75)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,48 \cdot 112,5 = 54,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (7.76)$$

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(1249,5 - 312,5) - (933,8 - 312,5)}{2,3 \cdot \log \frac{1249,5 - 312,5}{933,8 - 312,5}} = 769,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.77)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{výp-dp} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (7.78)$$

$$Q_k^{výp-dp} = \frac{54,0 \cdot 769,3 \cdot 94,49}{3,319} \cdot 10^{-3} = 1182,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{výp-dp} - Q_b^{výp-dp} = 1182,81 - 1182,81 = 0,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.79)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{výp-b}} = \frac{0,00}{1182,81} \cdot 100 = 0,00 \% \quad (7.80)$$

**8 PP4 A DOPLŇKOVÉ PLOCHY**

Sálavé teplo z ohniště a z prostoru deskového přehříváku zachycené v prostoru svazku následujícího za deskovým přehřívákem

$$F_{sv} = 6,1189 \cdot 5,76 = 35,24 \text{ m}^2 \quad (8.1)$$

$$Q_s^{za PP3} = \frac{q_{sv} \cdot F_{sv}}{M_{pv}} = \frac{45,2 \cdot 35,24}{3,319} = 479,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.2)$$

**Rozdělení sálavého tepla**

$$S_{PP4} = 243,84 \text{ m}^2; S_{PP1-2} = 5,29 \text{ m}^2;$$

$$S_{výp-b} = 9,30 \text{ m}^2; S_{výp-š} = 13,30 \text{ m}^2;$$

$$S_d = S_{PP1-2} + S_{výp-b} + S_{výp-š} \quad (8.3)$$

$$S_d = 5,29 + 9,30 + 13,30 = 27,89 \text{ m}^2;$$

$$Q_s^{PP4} = \frac{S_{PP4}}{S_{PP4} + S_d} \cdot Q_s^{za PP3} = \frac{243,84}{243,84 + 27,89} \cdot 479,89 = 430,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.4)$$

$$Q_s^{PP1-2} = \frac{S_{PP1-2}}{S_{PP4} + S_d} \cdot Q_s^{za PP3} = \frac{5,29}{243,84 + 27,89} \cdot 479,89 = 9,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.5)$$

$$Q_s^{výp-b} = \frac{S_{výp-b}}{S_{PP4} + S_d} \cdot Q_s^{za PP3} = \frac{9,30}{243,84 + 27,89} \cdot 479,89 = 16,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.6)$$

$$Q_s^{výp-š} = \frac{S_{výp-š}}{S_{PP4} + S_d \cdot Q_s^{zaPP3}} = \frac{13,30}{243,84 + 27,89} \cdot 479,89 = 23,49 \frac{kJ}{kg} \quad (8.7)$$

$$Q_{s,celk} = Q_s^{PP4} + Q_s^{PP1-2} + Q_s^{výp-b} + Q_s^{výp-š} \quad (8.8)$$

$$Q_{s,celk} = 430,63 + 9,35 + 16,42 + 23,49 = 479,89 \frac{kJ}{kg}$$

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN

$$Q_b = \varphi \cdot (I_B - I_C + \Delta I) + Q_{s,celk} \quad (8.9)$$

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0,02 \cdot 273,29 = 5,47 \frac{kJ}{kg} \quad (8.10)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (11895,71 - 10346,43 + 5,47) + 479,89 = 2023,67 \frac{kJ}{kg}$$

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ PÁRY

$$Q_b^{PP4} = \frac{M_{PP4}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP4}^{OUT} - I_{PP4}^{IN}) \quad (8.11)$$

$$Q_b^{PP4} = \frac{30}{3,319} \cdot (3483,10 - 3273,10) = 1898,19 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{PP1-2} = \frac{M_{PP1-2}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP1-2}^{OUT} - I_{PP1-2}^{IN}) \quad (8.12)$$

$$Q_b^{PP1-2} = \frac{27,6}{3,319} \cdot (2787,89 - 2784,20) = 30,65 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{výp-b} = 39,01 \frac{kJ}{kg} \quad (8.13)$$

$$Q_b^{výp-š} = 55,82 \frac{kJ}{kg} \quad (8.14)$$

$$Q_b = Q_b^{PP4} + Q_b^{PP1-2} + Q_b^{výp-b} + Q_b^{výp-š} \quad (8.15)$$

$$Q_b = 1898,19 + 30,65 + 39,01 + 55,82 = 2023,67 \frac{kJ}{kg}$$

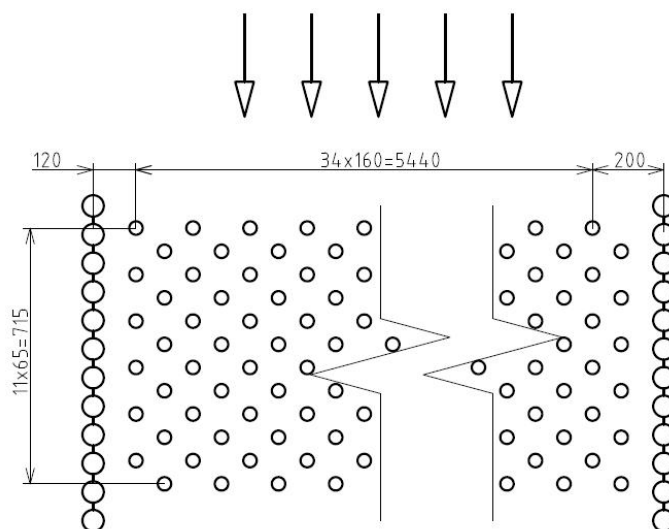
## 8.1 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 4

Tab. 8-1

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP4}^{IN}$	459,1	$I_{PP4}^{IN}$	3273,10	$p_{PP4}^{IN}$	9,6	$v_{PP4}^{IN}$	0,031775
výstupní parametry páry	$t_{PP4}^{OUT}$	540	$I_{PP4}^{OUT}$	3483,10	$p_{PP4}^{OUT}$	9,4	$v_{PP4}^{OUT}$	0,037500
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	933,8	$I_B$	10346,43				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	783,5	$I_C$	9962,25				

Tab. 8-2

vnější průměr trubky	$D$	38 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	26,8 mm
délka 1 hadu z 1. řady	$l_{1ř}$	29,62 m
délka 1 hadu z 2. řady	$l_{2ř}$	28,74 m
počet hadů z 1. řady	$n_{1ř}$	35
počet hadů z 2. řady	$n_{2ř}$	35
celkový počet hadů	$n$	70
příčná rozteč	$s_1$	160 mm
podélná rozteč	$s_2$	65 mm



Obr. 8-1 Přehřívák 4

**Plocha 1 hadu z 1. řady**

$$S_{1ř} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot \frac{38}{1000} \cdot 29,62 = 3,54 \text{ m}^2 \quad (8.16)$$

**Plocha 1 hadu z 2. řady**

$$S_{2ř} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot \frac{38}{1000} \cdot 28,74 = 3,43 \text{ m}^2 \quad (8.17)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = n_{1ř} \cdot S_{1ř} + n_{2ř} \cdot S_{2ř} = 35 \cdot 3,54 + 35 \cdot 3,43 = 243,84 \text{ m}^2 \quad (8.19)$$

**Kontrola šířky**

$$1,5 \cdot s_1 + (n_{1ř} - 1) \cdot s_1 = 1,5 \cdot 160 + (35 - 1) \cdot 160 = 5680 \text{ mm} \quad (8.20)$$

$$5680 \text{ mm} < 5760 \text{ mm}$$

**Střední teplota páry**

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP4}^{IN} + t_{PP4}^{OUT}}{2} = \frac{459,1 + 540,0}{2} = 499,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.21)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP4}^{IN} + v_{PP4}^{OUT}}{2} = \frac{0,031775 + 0,037500}{2} = 0,034637 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (8.22)$$

**Střední teplota spalín**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{933,8 + 783,5}{2} = 872,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.23)$$

**Rychlost spalín**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (8.24)$$

$$F_1 = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 5,886 - 35 \cdot \frac{38}{1000} \cdot 5443 = 26,66 \text{ m}^2 \quad (8.25)$$

$$F_2 = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 4,237 - 35 \cdot \frac{38}{1000} \cdot 4094 = 18,96 \text{ m}^2 \quad (8.26)$$

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 26,66 \cdot 18,96}{26,66 + 18,96} = 22,16 \quad (8.27)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,41}{22,16} \cdot \left(1 + \frac{872,4}{273}\right) = 5,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP4}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP4} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 0,034637}{\pi \cdot \left(\frac{26,8}{1000}\right)^2 \cdot 70} = 26,32 \frac{m}{s} \quad (8.28)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (8.29)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{160}{38} = 4,21 \quad (8.30)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{65}{38} = 1,71 \quad (8.31)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4}4,21^2 + 1,71^2} = 2,71 \quad (8.32)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,21 - 1}{2,71 - 1} = 1,87 \quad (8.33)$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,87^{0,1} = 0,362 \quad (8.34)$$

$$c_z = 1$$

$$\lambda = 0,0943 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0,0001443 \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0,58$$

$$\alpha_k = 0,362 \cdot 1 \cdot \frac{0,0943}{\frac{38}{1000}} \cdot \left(\frac{5,28 \cdot \frac{38}{1000}}{0,0001443}\right)^{0,6} \cdot 0,58^{0,33} = 57,7 \frac{W}{m^2K}$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.35)$$

$$\lambda = 0,0770 \frac{W}{mK}$$

$$\mu = 0,0000294 \frac{Ns}{m^2}$$

$$\nu = \mu \cdot v = 0,0000294 \cdot 0,034637 = 1,02 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad (8.36)$$

$$Pr = 0,98$$

$$c_t = 1; c_l = 1; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0770}{\frac{26,8}{1000}} \cdot \left( \frac{26,32 \cdot \frac{26,8}{1000}}{1,02 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,98^{0,4} = 3082,7 \frac{W}{m^2 K}$$

### SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.37)$$

### Stupeň černosti proudů spalin

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (8.38)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.39)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{26,811}{86,20 + 243,84} = 0,2925 \text{ m} \quad (8.40)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.41)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2925}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1145,6}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,4422 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (8.42)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1145,6^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,4404 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,4422 + 1,4404) \cdot 0,1 \cdot 0,2794 = 0,1720$$

$$a = 1 - e^{-0,1720} = 0,1581$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (8.43)$$

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,0031 + 0,0025 = 0,005 \frac{m^2 K}{W} \quad (8.44)$$

kde  $c_d$  – opravný koeficient na vnější průměr trubky (určí se z obr. 8-20 na str. 127 v [1]),  $c_f$  – opravný koeficient na frakci popílkových částic (pro uhlí  $c_f=1$  podle [1]),  $\varepsilon_0$  – výchozí součinitel zanesení (určí se z obr. 8-20 na str. 127 v [1])

$$t_z = 499,6 + \left(0,005 + \frac{1}{3082,7}\right) \cdot \frac{3,319 \cdot (1898,19 + 430,62)}{243,84} \cdot 10^{-3}$$

$$t_z = 668,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 941,5 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1581 \cdot 1145,6^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{941,5}{1145,6}\right)^4}{1 - \frac{841,5}{1145,6}} = 37,2 \frac{W}{mK}$$

$$\alpha'_s = k_o \cdot \alpha_s = \left[1 + A \cdot \left(\frac{T_0}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_0}{l_s}\right)^{0,07}\right] \cdot \alpha_s \quad (8.45)$$

kde  $T_0$  – teplota spalin ve volném objemu před svazkem [K],  $l_0$ ;  $l_s$  – hloubka volného objemu a svazku [m],  $A=0,4$  – koeficient při spalování černého uhlí.

$$\alpha'_s = \left[1 + 0,4 \cdot \left(\frac{1206,9}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,445}{0,715}\right)^{0,07}\right] \cdot 37,2 = 52,3 \frac{W}{mK}$$

### SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha'_s) = 1 \cdot (57,7 + 52,3) = 110,0 \frac{W}{m^2 K} \quad (8.46)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{110,0}{1 + \left(0,005 + \frac{1}{3082,7}\right) \cdot 110,0} = 69,4 \frac{W}{m^2 K} \quad (8.47)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(933,8 - 459,1) - (811,1 - 540,0)}{2,3 \cdot \log \frac{933,8 - 459,1}{811,1 - 540,0}} = 351,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.48)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{PP4} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (8.49)$$

$$Q_k^{PP4} = \frac{69,4 \cdot 363,8 \cdot 243,84}{3,319} \cdot 10^{-3} = 1854,69 \frac{kJ}{kg}$$



**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{PP4} - Q_b^{PP4} = 1854,69 - 1898,19 = -43,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.50)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP4}} = \frac{-43,49}{1898,19} \cdot 100 = -2,29 \% \quad (8.51)$$

**8.2 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 1 (2. ČÁST)**

Tab. 8-3

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP1-2}^{IN}$	321,2	$I_{PP1-2}^{IN}$	2784,20	$p_{PP1-2}^{IN}$	10,2	$v_{PP1-2}^{IN}$	0,018922
výstupní parametry páry	$t_{PP1-2}^{OUT}$	321,9	$I_{PP1-2}^{OUT}$	2787,89	$p_{PP1-2}^{OUT}$	10,2	$v_{PP1-2}^{OUT}$	0,019001
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	933,8	$I_B$	11895,71				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	811,1	$I_C$	10346,43				

Tab. 8-4

vnější průměr trubky	$D$	32 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	20,8 mm
délka trubek	$l$	918,9 mm
celkový počet trubek	$n$	70
příčná rozteč	$s_1$	80 mm

**Celková plocha**

$$S = b \cdot l = 5,76 \cdot 0,9189 = 5,29 \text{ m}^2 \quad (8.52)$$

**Střední teplota páry**

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP1-2}^{IN} + t_{PP1-2}^{OUT}}{2} = \frac{321,2 + 321,9}{2} = 321,6 \text{ °C} \quad (8.53)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP1-2}^{IN} + v_{PP1-2}^{OUT}}{2} = \frac{0,018922 + 0,019001}{2} = 0,018961 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (8.54)$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP1}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP1} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,018961}{\pi \cdot \left(\frac{20,8}{1000}\right)^2 \cdot 70} = 22,00 \frac{m}{s} \quad (8.55)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,78 \cdot 21 = 16,4 \frac{W}{m^2K} \quad (8.56)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.57)$$

$$\lambda = 0,0706 \frac{W}{mK}$$

$$\mu = 0,00002144 \frac{Ns}{m^2}$$

$$\nu = \mu \cdot v = 0,00002144 \cdot 0,018961 = 4,07 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (8.58)$$

$$Pr = 1,56$$

$$c_t = 1; c_l = 1,8; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0706}{\frac{20,8}{1000}} \cdot \left(\frac{22,00 \cdot \frac{20,8}{1000}}{4,07 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,56^{0,4} \cdot 1,8$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 11645,0 \frac{W}{m^2K}$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.59)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (8.60)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.61)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{26,81}{86,20 + 243,84} = 0,2925 m \quad (8.62)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.63)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2925}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1145,6}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,4422 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (8.64)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1145,6^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,4404 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,4422 + 1,4404) \cdot 0,1 \cdot 0,2925 = 0,1720$$

$$a = 1 - e^{-0,1720} = 0,1581$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (8.65)$$

$$t_z = 322,0 + \left( 0,0043 + \frac{1}{11488,7} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot (30,65 + 9,35)}{5,29} \cdot 10^{-3}$$

$$t_z = 431,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 704,7 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1581 \cdot 1145,6^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{704,7}{1145,6} \right)^4}{1 - \frac{704,7}{1145,6}} = 27,1 \frac{W}{mK}$$

### SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (16,4 + 27,1) = 41,3 \frac{W}{m^2K} \quad (8.66)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{41,3}{1 + \left( 0,0043 + \frac{1}{11645,0} \right) \cdot 41,3} = 35,0 \frac{W}{m^2K} \quad (8.67)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(933,8 - 321,2) - (811,1 - 321,9)}{2,3 \cdot \log \frac{933,8 - 321,2}{811,1 - 321,9}} = 549,2^\circ\text{C} \quad (8.68)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{PP1-2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (8.69)$$

$$Q_k^{PP1-2} = \frac{35,0 \cdot 549,2 \cdot 5,29}{3,319} \cdot 10^{-3} = 30,65 \frac{kJ}{kg}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{PP1-2} - Q_b^{PP1-2} = 30,65 - 30,65 = 0,00 \frac{kJ}{kg} \quad (8.70)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP1-2}} = \frac{0,00}{46,74} \cdot 100 = 0,00 \% \quad (8.71)$$

**8.3 VÝPARNÍK (MEMBRÁNOVÉ STĚNY NA BOCÍCH TAHU)**

Tab. 8-5

vnější průměr trubky	$D$	60,3 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	49,1 mm

**Celková plocha**

$$S = 2 \cdot \left( 6,1189 \cdot 0,9189 - \frac{0,9189 \cdot 2,1189}{2} \right) = 9,30 \text{ m}^2 \quad (8.72)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,78 \cdot 18,5 = 14,4 \frac{W}{m^2K} \quad (8.73)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.74)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (8.75)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.76)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{26,81}{86,20 + 243,84} = 0,2925 \quad (8.77)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.78)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2925}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1145,6}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,4422 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (8.79)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1145,6^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,4404 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,4422 + 1,4404) \cdot 0,1 \cdot 0,2925 = 0,1720$$

$$a = 1 - e^{-0,1720} = 0,1581$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (8.80)$$

$$t_z = 312,6 + (0,0043 + 0) \cdot \frac{3,319 \cdot (39,01 + 16,42)}{9,30} \cdot 10^{-3} = 397,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 670,7 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1581 \cdot 1145,6^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{670,7}{1145,6} \right)^4}{1 - \frac{670,7}{1145,6}} = 25,9 \frac{W}{mK} \quad (8.81)$$

### SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (14,4 + 25,9) = 38,4 \frac{W}{m^2K} \quad (8.82)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 38,4 = 24,9 \frac{W}{m^2K} \quad (8.83)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(933,8 - 312,5) - (811,1 - 312,5)}{2,3 \cdot \log \frac{933,8 - 312,5}{811,1 - 312,5}} = 558,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.84)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{výp-b} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (8.85)$$

$$Q_k^{výp-b} = \frac{24,9 \cdot 558,3 \cdot 9,30}{3,319} \cdot 10^{-3} = 39,00 \frac{kJ}{kg}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{výp-b} - Q_b^{výp-b} = 39,00 - 39,01 = -0,01 \frac{kJ}{kg} \quad (8.86)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{výp-b}} = \frac{-0,01}{39,01} \cdot 100 = -0,03 \% \quad (8.87)$$

**8.4 VÝPARNÍK (ŠIKMÁ MEMBRÁNOVÁ STĚNA)**

Tab. 8-6

vnější průměr trubky	$D$	60,3 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	49,1 mm

**Celková plocha**

$$S = b \cdot l = 5,76 \cdot 2,3095 = 13,30 \text{ m}^2 \quad (8.88)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,78 \cdot 18,5 = 14,4 \frac{W}{m^2K} \quad (8.89)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.90)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (8.91)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (8.92)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{26,81}{86,20 + 243,84} = 0,2925 \quad (8.93)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.94)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2925}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1145,6}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,4422 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (8.95)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1145,6^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,4404 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,4422 + 1,4404) \cdot 0,1 \cdot 0,2925 = 0,1720$$

$$a = 1 - e^{-0,1720} = 0,1581$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot (Q + Q_s)}{S} \cdot 10^{-3} \quad (8.96)$$

$$t_z = 312,5 + (0,0043 + 0) \cdot \frac{3,319 \cdot (55,82 + 23,49)}{13,30} \cdot 10^{-3} = 397,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 670,7 \text{ } K$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1581 \cdot 1145,6^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{670,7}{1145,6} \right)^4}{1 - \frac{670,7}{1145,6}} = 25,9 \frac{W}{mK}$$

**SOUČINITEĽ PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (14,4 + 25,9) = 38,4 \frac{W}{m^2K} \quad (8.97)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 38,4 = 24,9 \frac{W}{m^2K} \quad (8.98)$$

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(933,8 - 312,5) - (811,1 - 312,5)}{2,3 \cdot \log \frac{933,8 - 312,5}{811,1 - 312,5}} = 558,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.99)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{výp-š} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (8.100)$$

$$Q_k^{výp-š} = \frac{24,9 \cdot 558,3 \cdot 13,30}{3,319} \cdot 10^{-3} = 55,80 \frac{kJ}{kg}$$

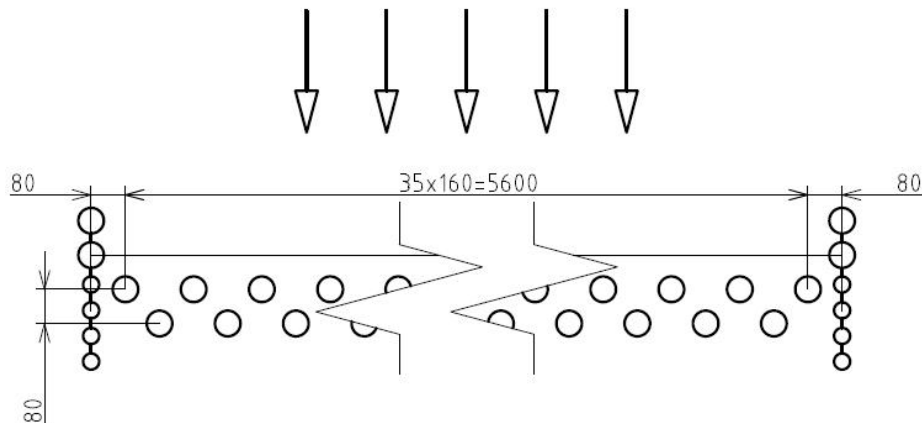
**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{\text{výp-š}} - Q_b^{\text{výp-š}} = 55,80 - 55,82 = -0,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.101)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{\text{výp-š}}} = \frac{-0,02}{97,67} \cdot 100 = -0,03 \% \quad (8.102)$$

**9 MŘÍŽ****Tab. 9-1**

vnější průměr trubky	$D$	60,3 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	49,1 mm
délka trubek	$l$	4000 mm
počet trubek v 1 řadě	$n_{1r}$	35
celkový počet trubek	$n$	70
počet řad	$z$	2
příčná rozteč	$s_1$	160 mm
podélná rozteč	$s_2$	80 mm
úhlopříčná rozteč	$s_u$	110 mm

**Obr. 9-1 Mříž****TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_C - I_D + \Delta I) \quad (9.1)$$

$$\Delta I = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (9.2)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (10346,43 - 9962,25 + 0) = 381,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



**TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ VODY**

$$Q_b = 381,47 \frac{kJ}{kg} \quad (9.3)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n = \pi \cdot \frac{60,3}{1000} \cdot 4 \cdot 70 = 53,04 \text{ m}^2 \quad (9.4)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{811,1 + 783,5}{2} = 797,3 \text{ °C} \quad (9.5)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (9.6)$$

$$F_{sp} = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 4 - 35 \cdot \frac{60,3}{1000} \cdot 4000 = 14,60 \text{ m}^2 \quad (9.7)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,48}{14,60} \cdot \left(1 + \frac{797,3}{273}\right) = 7,56 \frac{m}{s}$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.8)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{160}{60,3} = 2,65 \quad (9.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{80}{60,3} = 1,33 \quad (9.10)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} 2,65^2 + 1,33^2} = 1,88 \quad (9.11)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2,65 - 1}{1,88 - 1} = 1,89 \quad (9.12)$$

$$c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 1,89^{0,1} = 0,378 \quad (9.13)$$

$$c_z = 3,12 \cdot z^{0,05} - 2,5 = 3,12 \cdot 2^{0,05} - 2,5 = 0,730 \quad (9.14)$$

$$\lambda = 0,0882 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0,0001296 \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0,59$$

$$\alpha_k = 0,378 \cdot 0,730 \cdot \frac{0,0882}{\frac{60,3}{1000}} \cdot \left( \frac{7,56 \cdot \frac{60,3}{1000}}{0,0001296} \right)^{0,6} \cdot 0,59^{0,33} = 45,5 \frac{W}{m^2K}$$

### SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.15)$$

### Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.16)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (9.17)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{4,608}{49,98 + 53,04} = 0,1610 \quad (9.18)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (9.19)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,1610}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1070,4}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 6,3231 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (9.20)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1070,4^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,5070 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (6,3231 + 1,5070) \cdot 0,1 \cdot 0,1610 = 0,1261$$

$$a = 1 - e^{-0,1261} = 0,1185$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q}{S} \cdot 10^{-3} \quad (9.21)$$

$$t_z = 312,5 + (0,0043 + 0) \cdot \frac{3,319 \cdot 381,47}{53,04} \cdot 10^{-3} = 415,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 688,2 \text{ } K$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1185 \cdot 1070,4^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{688,2}{1070,4}\right)^4}{1 - \frac{688,2}{1070,4}} = 17,3 \frac{W}{mK}$$

**SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (45,5 + 17,3) = 62,8 \frac{W}{m^2K} \quad (9.22)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{62,8}{1 + 0,0043 \cdot 62,8} = 49,4 \frac{W}{m^2K} \quad (9.23)$$

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(811,1 - 312,5) - (783,5 - 312,5)}{2,3 \cdot \log \frac{811,1 - 312,5}{783,5 - 312,5}} = 485,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.24)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^m = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (9.25)$$

$$Q_k^m = \frac{49,4 \cdot 485,2 \cdot 53,0}{3,319} \cdot 10^{-3} = 383,37 \frac{kJ}{kg}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^m - Q_b = 383,37 - 381,47 = 1,9 \frac{kJ}{kg} \quad (9.26)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b} = \frac{1,9}{381,47} \cdot 100 = 0,50 \% \quad (9.27)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_k^{výp} - Q_{výp} = \\ &= (Q_{oh} + Q_k^{výp-dp} + Q_k^{výp-b} + Q_k^{výp-š} + Q_k^m) \cdot M_{pv} - Q_{výp} \end{aligned} \quad (9.28)$$

kde  $Q_{oh}$  - teplo na trubky výparníku v ohništi [kJ/kg], určí se dle rovnice (9.29)

$$Q_{oh} = Q_s - Q_{s0} \quad (9.29)$$

kde  $Q_s$  - mn. tepla odevzdané v ohništi do všech stěn (5.24) [kJ/kg],  $Q_{s0}$  - mn. tepla vysálané z ohniště do prostoru deskového přehříváku [kJ/kg], určí se z rovnice (9.30)

$$Q_{s0} = \frac{q_0 \cdot F_0}{M_{pv}} = \frac{71,7 \cdot 27,88}{3,319} = 602,39 \frac{kJ}{kg} \quad (9.30)$$

kde  $q_0$  - hustota tepelného toku výstupním průřezem (7.1) [kW/m<sup>2</sup>],  $F_0$  - plocha výstupního průřezu (7.5) [m<sup>2</sup>],  $M_{pv}$  - mn. skutečně spáleného paliva (4.13) [kg/s]

$$Q_{oh} = 12034,80 - 602,39 = 11432,42 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta Q = (11432,42 + 1182,81 + 39,00 + 55,80 + 383,37) \cdot 3,319 - 43755,94 = -305,70 kW$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_{výp}} = \frac{-305,70}{43755,94} \cdot 100 = -0,70 \% \quad (9.31)$$

## 10 PP2 A DOPLŇKOVÉ PLOCHY

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN

$$Q_b = \varphi \cdot (I_D - I_E + \Delta I) \quad (10.1)$$

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0,02 \cdot 273,29 = 5,47 \frac{kJ}{kg} \quad (10.2)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (9962,25 - 7019,40 + 5,47) = 2927,51 \frac{kJ}{kg}$$

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ PÁRY

$$Q_b^{PP2} = \frac{M_{PP2}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP2}^{OUT} - I_{PP2}^{IN}) \quad (10.3)$$

$$Q_b^{PP2} = \frac{27,6}{3,319} \cdot (3139,93 - 2799,93) = 2827,39 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{PP1-3} = \frac{M_{PP1-3}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP1-3}^{OUT} - I_{PP1-3}^{IN}) \quad (10.4)$$

$$Q_b^{PP1-3} = \frac{27,6}{3,319} \cdot (2793,03 - 2787,89) = 42,74 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_b^{PP1-4} = \frac{M_{PP1-4}}{M_{pv}} \cdot (I_{PP1-4}^{OUT} - I_{PP1-4}^{IN}) \quad (10.5)$$

$$Q_b^{PP1-4} = \frac{27,6}{3,319} \cdot (2799,93 - 2793,03) = 57,38 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{b,celk} = Q_b^{PP2} + Q_b^{PP1-3} + Q_b^{PP1-4} \quad (10.6)$$

$$Q_{b,celk} = 2827,39 + 42,74 + 57,38 = 2927,51 \frac{kJ}{kg}$$

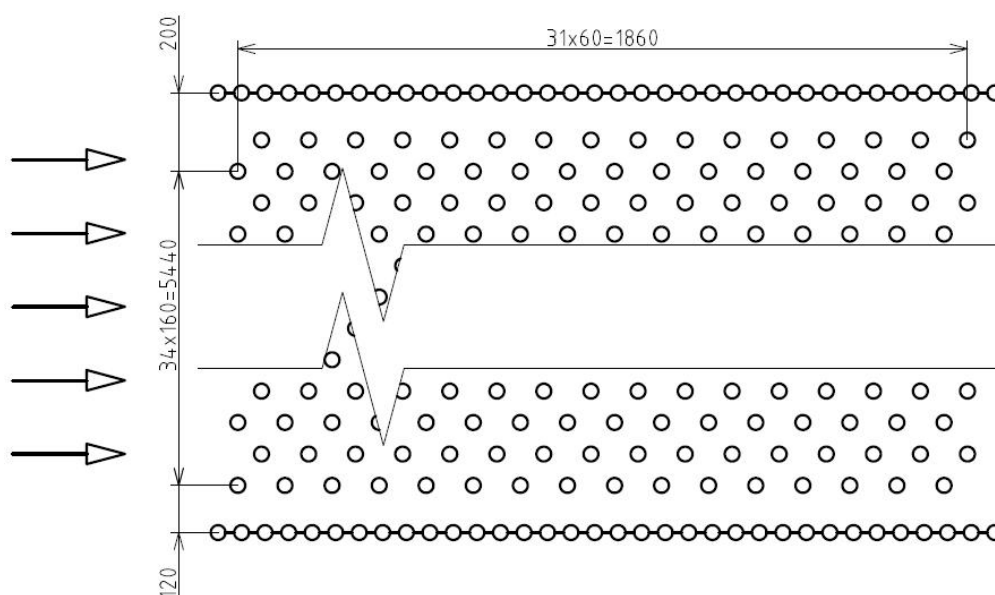
## 10.1 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 2

Tab. 10-1

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP2}^{IN}$	323,1	$I_{PP2}^{IN}$	2799,9	$p_{PP2}^{IN}$	10	$v_{PP2}^{IN}$	0,019651
výstupní parametry páry	$t_{PP2}^{OUT}$	412,7	$I_{PP2}^{OUT}$	3139,93	$p_{PP2}^{OUT}$	9,8	$v_{PP2}^{OUT}$	0,027991
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	783,5	$I_D$	9962,25				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	559,3	$I_E$	7019,40				

Tab. 10-2

vnější průměr trubky	$D$	38 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	26,8 mm
délka 1 hadu	$l$	66,78 m
počet hadů z 1. řady	$n_{1ř}$	35
počet hadů z 2. řady	$n_{2ř}$	35
celkový počet hadů	$n$	70
příčná rozteč	$s_1$	160 mm
podélná rozteč	$s_2$	60 mm



Obr. 10-1 Přehřívák 2

**Plocha 1 hadu**

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot \frac{32}{1000} \cdot 66,78 = 7,97 \text{ m}^2 \quad (10.7)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = n \cdot S_1 = 70 \cdot 7,97 = 558,02 \text{ m}^2 \quad (10.8)$$

**Kontrola šířky**

$$1,5 \cdot s_1 + (n_{1ř} - 1) \cdot s_1 = 1,5 \cdot 160 + (35 - 1) \cdot 160 = 5680 \text{ mm} \quad (10.9)$$

$$5680 \text{ mm} < 5760 \text{ mm} \quad (10.10)$$

**Střední teplota páry**

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP2}^{IN} + t_{PP2}^{OUT}}{2} = \frac{323,1 + 412,7}{2} = 367,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.11)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP2}^{IN} + v_{PP2}^{OUT}}{2} = \frac{0,019651 + 0,027991}{2} = 0,023821 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (10.12)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{793,5 + 559,3}{2} = 671,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.13)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (10.14)$$

$$F_{sp} = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 4 - 35 \cdot \frac{32}{1000} \cdot 3950 = 17,79 \text{ m}^2 \quad (10.15)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,55}{17,79} \cdot \left(1 + \frac{671,4}{273}\right) = 5,52 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP2}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP2} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,023821}{\pi \cdot \left(\frac{26,8}{1000}\right)^2 \cdot 70} = 16,65 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10.16)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (10.17)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{160}{38} = 4,21 \quad (10.18)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{60}{38} = 1,58 \quad (10.19)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4}4,21^2 + 1,58^2} = 2,63 \quad (10.20)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,21 - 1}{2,63 - 1} = 1,97 \quad (10.21)$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,97^{0,1} = 0,364 \quad (10.22)$$

$$c_z = 1$$

$$\lambda = 0,0777 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0,000105 \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0,60$$

$$\alpha_k = 0,364 \cdot 1 \cdot \frac{0,0777}{\frac{38}{1000}} \cdot \left( \frac{5,52 \cdot \frac{38}{1000}}{0,000105} \right)^{0,6} \cdot 0,60^{0,33} = 60,1 \frac{W}{m^2K}$$

### SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.23)$$

$$\lambda = 0,0685 \frac{W}{mK}$$

$$\mu = 0,00002437 \frac{Ns}{m^2}$$

$$\nu = \mu \cdot v = 0,00002437 \cdot 0,023821 = 5,81 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (10.24)$$

$$Pr = 1,30$$

$$c_t = 1; c_l = 1; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0685}{\frac{26,8}{1000}} \cdot \left( \frac{16,65 \cdot \frac{26,8}{1000}}{5,85 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,30^{0,4} = 3337,7 \frac{W}{m^2K}$$

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.25)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.26)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (10.27)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{52,070}{90,20 + 554,59} = 0,2907 \quad (10.28)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (10.29)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2907}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{944,5}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,0310 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (10.30)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{944,5^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,6381 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,0310 + 1,6381) \cdot 0,1 \cdot 0,2907 = 0,1939$$

$$a = 1 - e^{-0,1939} = 0,1762$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q}{S} \cdot 10^{-3} \quad (10.31)$$

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,004 + 0,0025 = 0,0057 \frac{m^2K}{W} \quad (10.32)$$

$$t_z = 367,9 + \left( 0,0057 + \frac{1}{3337,3} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot 2827,39}{554,59} \cdot 10^{-3} = 469,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 742,6 \text{ } K$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1762 \cdot 944,5^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{742,6}{944,5}\right)^4}{1 - \frac{742,6}{944,5}} = 22,0 \frac{W}{mK}$$



$$\alpha'_s = k_o \cdot \alpha_s = \left[ 1 + A \cdot \left( \frac{T_0}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{l_0}{l_s} \right)^{0,07} \right] \cdot \alpha_s \quad (10.33)$$

$$\alpha'_s = \left[ 1 + 0,4 \cdot \left( \frac{1056,6}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{0,32}{1,86} \right)^{0,07} \right] \cdot 22,0 = 29,9 \frac{W}{mK}$$

**SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha'_s) = 0,95 \cdot (60,1 + 29,9) = 85,5 \frac{W}{m^2K} \quad (10.34)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{85,5}{1 + \left( 0,0057 + \frac{1}{3337,7} \right) \cdot 85,5} = 56,5 \frac{W}{m^2K} \quad (10.35)$$

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(783,5 - 412,7) - (559,3 - 323,1)}{2,3 \cdot \log \frac{783,5 - 412,7}{559,3 - 323,1}} = 298,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.36)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{PP2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (10.37)$$

$$Q_k^{PP2} = \frac{56,5 \cdot 298,8 \cdot 554,59}{3,319} \cdot 10^{-3} = 2820,75 \frac{kJ}{kg}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{PP2} - Q_b^{PP2} = 2820,75 - 2827,39 = -6,64 \frac{kJ}{kg} \quad (10.38)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP2}} = \frac{-6,64}{2827,39} \cdot 100 = -0,23 \% \quad (10.39)$$

## 10.2 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 1 (3. ČÁST)

Tab. 10-3

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP1-3}^{IN}$	321,9	$I_{PP1-3}^{IN}$	2787,89	$p_{PP1-3}^{IN}$	10	$v_{PP1-3}^{IN}$	0,019192
výstupní parametry páry	$t_{PP1-3}^{OUT}$	322,8	$I_{PP1-3}^{OUT}$	2793,03	$p_{PP1-3}^{OUT}$	10	$v_{PP1-3}^{OUT}$	0,019304
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	783,5	$I_D$	9962,25				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	559,3	$I_E$	7019,40				

Tab. 10-4

vnější průměr trubky	$D$	32 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	20,8 mm
délka trubek	$l$	2420 mm
celkový počet trubek	$n$	71
příčná rozteč	$s_1$	80 mm

### Celková plocha

$$S = b \cdot l = 5,76 \cdot 2,42 = 13,94 \text{ m}^2 \quad (10.40)$$

### Střední teplota páry

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP1-3}^{IN} + t_{PP1-3}^{OUT}}{2} = \frac{321,9 + 322,8}{2} = 322,3 \text{ °C} \quad (10.41)$$

### Střední měrný objem páry

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP1-3}^{IN} + v_{PP1-3}^{OUT}}{2} = \frac{0,019192 + 0,019304}{2} = 0,019248 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (10.42)$$

### Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{PP1}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP1} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,019248}{\pi \cdot \left(\frac{20,8}{1000}\right)^2 \cdot 70} = 22,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10.43)$$

**SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,84 \cdot 21,5 = 18,1 \frac{W}{m^2K} \quad (10.44)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.45)$$

$$\lambda = 0,0705 \frac{W}{mK}$$

$$\mu = 0,00002149 \frac{Ns}{m^2}$$

$$\nu = \mu \cdot v = 0,00002149 \cdot 0,019248 = 4,14 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (10.46)$$

$$Pr = 1,54$$

$$c_t = 1; c_l = 1; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0705}{\frac{20,8}{1000}} \cdot \left( \frac{22,33 \cdot \frac{20,8}{1000}}{4,14 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,54^{0,4} = 6431,7 \frac{W}{m^2K}$$

**SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.47)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.48)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (10.49)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{52,07}{90,20 + 554,59} = 0,2907 \quad (10.50)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (10.51)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2907}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{944,5}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,0310 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (10.52)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{944,5^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,6381 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,0310 + 1,6381) \cdot 0,1 \cdot 0,2907 = 0,1939$$

$$a = 1 - e^{-0,1939} = 0,1762$$

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q}{S} \cdot 10^{-3} \quad (10.53)$$

$$t_z = 322,3 + \left( 0,0043 + \frac{1}{6431,7} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot 42,74}{13,94} \cdot 10^{-3} = 367,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 640,8 \text{ K}$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1762 \cdot 944,5^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{640,8}{944,5} \right)^4}{1 - \frac{640,8}{944,5}} = 18,7 \frac{W}{mK}$$

### SOUČINITEĽ PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (18,1 + 18,7) = 34,9 \frac{W}{m^2K} \quad (10.54)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{34,9}{1 + \left( 0,0043 + \frac{1}{6431,7} \right) \cdot 34,9} = 30,2 \frac{W}{m^2K} \quad (10.55)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(783,5 - 321,9) - (559,3 - 322,8)}{2,3 \cdot \log \frac{783,5 - 322,5}{559,3 - 324,0}} = 337,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.56)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{PP1-3} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (10.57)$$

$$Q_k^{PP1-3} = \frac{30,2 \cdot 337,0 \cdot 13,94}{3,319} \cdot 10^{-3} = 42,74 \frac{kJ}{kg}$$

### KONTROLA

$$\Delta Q = Q_k^{PP1-3} - Q_b^{PP1-3} = 42,74 - 42,74 = 0,00 \frac{kJ}{kg} \quad (10.58)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP1-3}} = \frac{0,00}{42,74} \cdot 100 = 0,00 \% \quad (10.59)$$

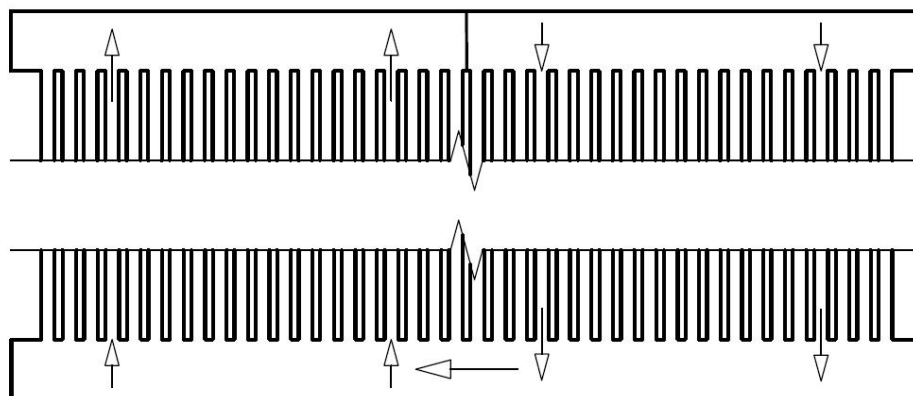
### 10.3 PŘEHŘÍVÁK PÁRY 1 (4. ČÁST)

Tab. 10-5

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry páry	$t_{PP1-4}^{IN}$	322,8	$I_{PP1-4}^{IN}$	2793,03	$p_{PP1-4}^{IN}$	10	$v_{PP1-4}^{IN}$	0,019304
výstupní parametry páry	$t_{PP1-4}^{OUT}$	323,1	$I_{PP1-4}^{OUT}$	2799,93	$p_{PP1-4}^{OUT}$	10	$v_{PP1-4}^{OUT}$	0,019454
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	783,5	$I_D$	9962,25				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	559,3	$I_E$	7019,40				

Tab. 10-6

vnější průměr trubky	$D$	38 mm
tloušťka stěny	$s_r$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	26,8 mm
rozteč membránové stěny	$s_1$	60 mm



Obr. Chyba! V dokumentu není žádný text v zadaném stylu.. 10-2 Schématické znázornění proudění v membránové stěně PP1 na bocích tahu

**Celková plocha**

$$S = x \cdot l = 4 \cdot 2,4 = 19,20 \text{ m}^2 \quad (10.60)$$

**Střední teplota páry**

$$t_p^{stř} = \frac{t_{PP1-4}^{IN} + t_{PP1-4}^{OUT}}{2} = \frac{322,8 + 323,1}{2} = 322,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.61)$$

**Střední měrný objem páry**

$$v_p^{stř} = \frac{v_{PP1-4}^{IN} + v_{PP1-4}^{OUT}}{2} = \frac{0,019304 + 0,019454}{2} = 0,019379 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (10.62)$$

**Rychlost páry**

$$w_p = \frac{M_{PP1}}{F_p} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{PP1} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,019379}{\pi \cdot \left(\frac{26,8}{1000}\right)^2 \cdot 40} = 23,70 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10.63)$$

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_K = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 0,84 \cdot 21,5 = 18,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (10.64)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U PÁRY**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.65)$$

$$\lambda = 0,0705 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\mu = 0,00002155 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$\nu = \mu \cdot v = 0,00002155 \cdot 0,019379 = 4,18 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (10.66)$$

$$Pr = 1,55$$

$$c_t = 1; c_l = 1; c_m = 1$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0705}{\frac{26,8}{1000}} \cdot \left(\frac{23,70 \cdot \frac{26,8}{1000}}{4,18 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,55^{0,4} = 6362,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**SOUČINITEĽ PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.67)$$

**Stupeň černosti proudu spalín**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.68)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (10.69)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st} + F} = 3,6 \cdot \frac{52,07}{90,20 + 554,59} = 0,2907 \quad (10.70)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (10.71)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,2907}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{944,5}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,0310 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (10.72)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{944,5^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,6381 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,0310 + 1,6381) \cdot 0,1 \cdot 0,2907 = 0,1939$$

$$a = 1 - e^{-0,1939} = 0,1762$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{M_{pv} \cdot Q}{S} \cdot 10^{-3} \quad (10.73)$$

$$t_z = 322,9 + \left( 0,0043 + \frac{1}{6362,9} \right) \cdot \frac{3,319 \cdot 57,38}{19,20} \cdot 10^{-3} = 367,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = 640,3 \text{ } K$$

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1762 \cdot 944,5^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{640,3}{944,5} \right)^4}{1 - \frac{640,3}{944,5}} = 18,7 \frac{W}{mK}$$

**SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,95 \cdot (18,1 + 18,7) = 34,9 \frac{W}{m^2K} \quad (10.74)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{34,9}{1 + \left( 0,0043 + \frac{1}{6362,9} \right) \cdot 34,9} = 30,2 \frac{W}{m^2K} \quad (10.75)$$

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(783,5 - 323,1) - (559,3 - 322,8)}{2,3 \cdot \log \frac{783,5 - 325,3}{559,3 - 324,0}} = 336,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.76)$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{PP1-4} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (10.77)$$

$$Q_k^{PP1-4} = \frac{30,2 \cdot 336,5 \cdot 19,20}{3,319} \cdot 10^{-3} = 58,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{PP1-4} - Q_b^{PP1-4} = 58,76 - 57,38 = 1,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (10.78)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b^{PP1-4}} = \frac{1,38}{57,38} \cdot 100 = 2,41 \% \quad (10.79)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_k^{PP1} - Q_{PP1} = \\ &= (Q_k^{PP1-1} + Q_k^{PP1-2} + Q_k^{PP1-3} + Q_k^{PP1-4}) \cdot M_{pv} - Q_{PP1} \end{aligned} \quad (10.80)$$

$$\Delta Q = (518,70 + 30,65 + 42,74 + 58,76) \cdot 3,319 - 2155,56 = 4,58 \text{ kW}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_{PP1}} = \frac{4,58}{2155,56} \cdot 100 = 0,21 \% \quad (10.81)$$



## 11 EKONOMIZÉR

### 11.1 EKONOMIZÉR – 2. DÍL

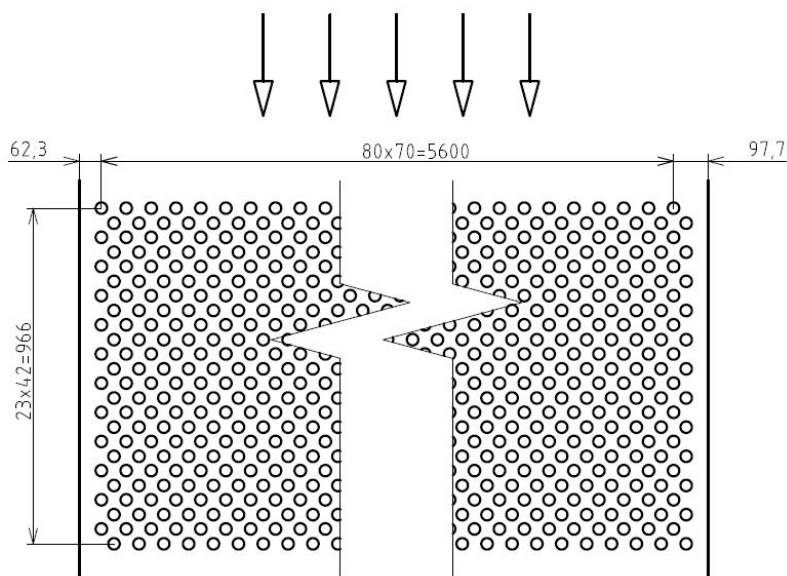
Při výpočtu je uvažováno sálání, jelikož se druhý díl ekonomizéru nachází v oblasti teploty spalin nad 500 °C.

Tab. 11-1

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry vody	$t_{EKO2}^{IN}$	201,8	$I_{EKO2}^{IN}$	864	$p_{EKO2}^{IN}$	10,35	$v_{EKO2}^{IN}$	0,001151
výstupní parametry vody	$t_{EKO2}^{OUT}$	260,5	$I_{EKO2}^{OUT}$	1136,5	$p_{EKO2}^{OUT}$	10,2	$v_{EKO2}^{OUT}$	0,001266
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	559,3	$I_E$	7019,40				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	381,4	$I_F$	4742,96				

Tab. 11-2

vnější průměr trubky	$D$	28 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	16,8 mm
délka 1 hadu	$l$	34,74 m
celkový počet hadů	$n$	162
příčná rozteč	$s_1$	70 mm
podélná rozteč	$s_2$	42 mm
úhlopříčná rozteč	$s_u$	52 mm



Obr. 11-1 Ekonomizér 2

**TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_E - I_F + \Delta I) \quad (11.1)$$

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0,02 \cdot 273,29 = 5,47 \frac{kJ}{kg} \quad (11.2)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (7019,40 - 4742,96 + 5,47) = 2265,80 \frac{kJ}{kg}$$

**TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ VODY**

$$Q_b = \frac{M_{EKO}}{M_{pv}} \cdot (I_{EKO1}^{OUT} - I_{EKO1}^{IN}) \quad (11.3)$$

$$Q_b = \frac{27,6}{3,319} \cdot (1136,48 - 864,00) = 2265,80 \frac{kJ}{kg}$$

**Plocha 1 hadu**

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot \frac{28}{1000} \cdot 33,03 = 2,91 m^2 \quad (11.4)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = n \cdot S_1 = 162 \cdot 2,91 = 470,65 m^2 \quad (11.5)$$

**Kontrola šířky**

$$1,5 \cdot s_1 + (n_{1ř} - 1) \cdot s_1 = 1,5 \cdot 70 + (81 - 1) \cdot 70 = 5705 mm \quad (11.6)$$

$$5705 mm < 5760 mm$$

**Střední teplota vody**

$$t_v^{stř} = \frac{t_{EKO2}^{IN} + t_{EKO2}^{OUT}}{2} = \frac{201,8 + 260,5}{2} = 231,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.7)$$

**Střední měrný objem vody**

$$v_v^{stř} = \frac{v_{EKO2}^{IN} + v_{EKO2}^{OUT}}{2} = \frac{0,001151 + 0,001266}{2} = 0,001208 \frac{m^3}{kg} \quad (11.8)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{559,3 + 381,4}{2} = 470,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.9)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (11.10)$$

$$F_{sp} = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 2,8 - 81 \cdot \frac{28}{1000} \cdot 2750 = 9,89 \text{ m}^2 \quad (11.11)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,69}{9,89} \cdot \left(1 + \frac{470,3}{273}\right) = 7,94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Rychlost vody**

$$w_v = \frac{M_{EKO}}{F_v} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{EKO} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,001208}{\pi \cdot \left(\frac{16,8}{1000}\right)^2 \cdot 162} = 0,93 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (11.12)$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.13)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{70}{28} = 2,5 \quad (11.14)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{42}{28} = 1,5 \quad (11.15)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} 2,5^2 + 1,5^2} = 1,95 \quad (11.16)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2,5 - 1}{1,95 - 1} = 1,57 \quad (11.17)$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,57^{0,1} = 0,356 \quad (11.18)$$

$$c_z = 1$$

$$\lambda = 0,0613 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$v = 0,0000708 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr = 0,62$$

$$\alpha_k = 0,352 \cdot 1 \cdot \frac{0,063}{28} \cdot \left(\frac{7,94 \cdot \frac{28}{1000}}{0,0000708}\right)^{0,6} \cdot 0,62^{0,33} = 83,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM**

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (11.19)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (11.20)$$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (11.21)$$

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

$$s = 0,9 \cdot \frac{28}{1000} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{70}{1000} \cdot \frac{40}{1000} - 1 \right) = 0,0951 \text{ m}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (11.23)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0764}{3,16 \cdot \sqrt{0,0226 \cdot 0,0951}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{743,5}{1000} \right) \cdot 0,2259$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 9,9238 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (11.24)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{743,5^2 \cdot 13^2}} \cdot 20,2762 = 1,9215 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

$$k \cdot p \cdot s = (9,9238 + 1,9215) \cdot 0,1 \cdot 0,0951 = 0,1127$$

$$a = 1 - e^{-0,1127} = 0,1066$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t + \Delta t = 231,1 + 60 = 291,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.25)$$

$$T_z = 560,1 \text{ K}$$

kde  $t$  – střední teplota média v trubkách [ $^\circ\text{C}$ ],  $\Delta t=60 \text{ } ^\circ\text{C}$  – platí pro jednostupňové ekonomizéry při  $\vartheta' > 400 \text{ } ^\circ\text{C}$  [1]

$$\alpha_s = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1066 \cdot 743,5^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{564,3}{743,5}\right)^4}{1 - \frac{564,3}{743,5}} = 6,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**SOUČINITELE PROSTUPU TEPLA**

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (83,4 + 6,2) = 89,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (11.26)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{89,6}{1 + 0,003498 \cdot 89,6} = 68,2 \frac{W}{m^2K} \quad (11.27)$$

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = 0,62 \cdot 1 \cdot 0,0029 + 0,0017 = 0,003498 \frac{m^2K}{W} \quad (11.28)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(559,3 - 260,5) - (381,4 - 201,8)}{2,3 \cdot \log \frac{559,3 - 260,5}{381,4 - 201,8}} = 234,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.29)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{EKO2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (11.30)$$

$$Q_k^{EKO2} = \frac{68,2 \cdot 234,4 \cdot 470,65}{3,319} \cdot 10^{-3} = 2268,13 \frac{kJ}{kg}$$

### KONTROLA

$$\Delta Q = Q_k^{EKO2} - Q_b = 2268,13 - 2265,80 = 2,33 \frac{kJ}{kg} \quad (11.31)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b} = \frac{2,33}{2268,13} \cdot 100 = 0,10 \% \quad (11.32)$$

## 11.2 EKONOMIZÉR – 1. DÍL

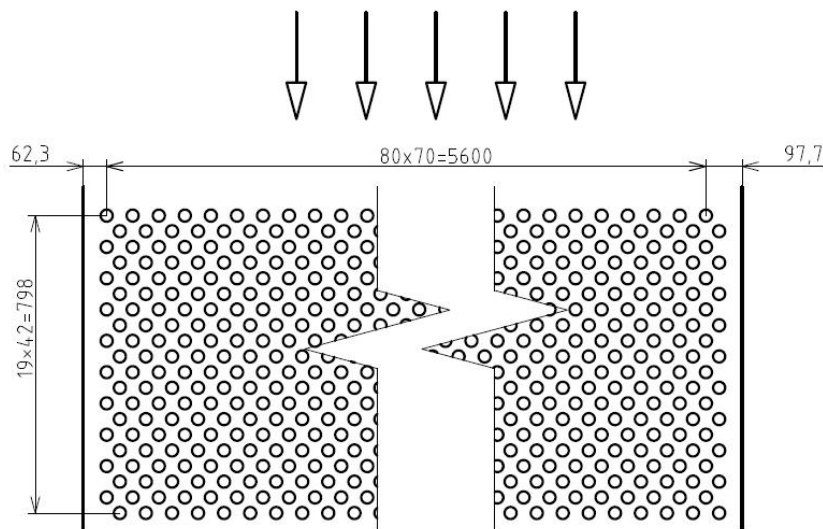
Při výpočtu není uvažováno sálání, jelikož se první díl ekonomizéru nenachází v oblasti teploty spalin nad 500 °C.

Tab. 11-3

	teplota [°C]		entalpie [kJ/kg]		tlak [MPa]		měr. obj. [m <sup>3</sup> /kg]	
vstupní parametry vody	$t_{EKO1}^{IN}$	170,0	$I_{EKO1}^{IN}$	724,59	$p_{EKO1}^{IN}$	10,5	$v_{EKO1}^{IN}$	0,001107
výstupní parametry vody	$t_{EKO1}^{OUT}$	201,8	$I_{EKO1}^{OUT}$	864	$p_{EKO1}^{OUT}$	10,35	$v_{EKO1}^{OUT}$	0,001151
parametry spalin před	$t_{sp}^{IN}$	381,4	$I_F$	4742,96				
parametry spalin za	$t_{sp}^{OUT}$	287,4	$I_G$	3580,88				

Tab. 11-4

vnější průměr trubky	$D$	28 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	5,6 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	16,8 mm
délka 1 hadu	$l$	23,13 m
celkový počet hadů	$n$	162
příčná rozteč	$s_1$	70 mm
podélná rozteč	$s_2$	42 mm
úhlopříčná rozteč	$s_u$	52 mm



Obr. 11-2 Ekonomizér 1

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN

$$Q_b = \varphi \cdot (I_F - I_G + \Delta I) \quad (11.33)$$

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0,02 \cdot 273,29 = 5,47 \frac{kJ}{kg} \quad (11.34)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (4742,96 - 3580,88 + 5,47) = 1159,31 \frac{kJ}{kg}$$

### TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ VODY

$$Q_b = \frac{M_{EKO}}{M_{pv}} \cdot (I_{EKO1}^{OUT} - I_{EKO1}^{IN}) \quad (11.35)$$

$$Q_b = \frac{27,6}{3,319} \cdot (864,00 - 724,59) = 1159,31 \frac{kJ}{kg}$$

**Plocha 1 hadu**

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot \frac{28}{1000} \cdot 27,53 = 2,42 \text{ m}^2 \quad (11.36)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = n \cdot S_1 = 162 \cdot 2,42 = 392,33 \text{ m}^2 \quad (11.37)$$

**Kontrola šířky**

$$1,5 \cdot s_1 + (n_{1ř} - 1) \cdot s_1 = 1,5 \cdot 70 + (81 - 1) \cdot 70 = 5705 \text{ mm} \quad (11.38)$$

$$5705 \text{ mm} < 5760 \text{ mm}$$

**Střední teplota vody**

$$t_v^{stř} = \frac{t_{EKO1}^{IN} + t_{EKO1}^{OUT}}{2} = \frac{170,0 + 201,8}{2} = 185,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11.39)$$

**Střední měrný objem vody**

$$v_v^{stř} = \frac{v_{EKO1}^{IN} + v_{EKO1}^{OUT}}{2} = \frac{0,001107 + 0,001151}{2} = 0,001129 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (11.40)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{381,4 + 287,4}{2} = 334,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11.41)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (11.42)$$

$$F_{sp} = b \cdot x - n_{1ř} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 2,8 - 81 \cdot \frac{28}{1000} \cdot 2750 = 9,89 \text{ m}^2 \quad (11.43)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 8,83}{9,89} \cdot \left(1 + \frac{334,4}{273}\right) = 6,59 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Rychlost vody**

$$w_v = \frac{M_{EKO}}{F_v} \cdot v = \frac{4 \cdot M_{EKO} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n} = \frac{4 \cdot 27,6 \cdot 0,001151}{\pi \cdot \left(\frac{16,8}{1000}\right)^2 \cdot 162} = 0,87 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (11.44)$$

**SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ U SPALIN**

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v}\right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.45)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{70}{28} = 2,5 \quad (11.46)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{42}{28} = 1,5 \quad (11.47)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4}2,5^2 + 1,5^2} = 1,95 \quad (11.48)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2,5 - 1}{1,95 - 1} = 1,57 \quad (11.49)$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,57^{0,1} = 0,356 \quad (11.50)$$

$$c_z = 1$$

$$\lambda = 0,0501 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0,0000504 \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0,64$$

$$\alpha_k = 0,356 \cdot 1 \cdot \frac{0,0501}{\frac{28}{1000}} \cdot \left( \frac{6,62 \cdot \frac{28}{1000}}{0,0000504} \right)^{0,6} \cdot 0,64^{0,33} = 75,5 \frac{W}{m^2K}$$

### SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA

$$\alpha_1 = \xi \cdot \alpha_k = 1 \cdot 75,5 = 75,5 \frac{W}{m^2K} \quad (11.51)$$

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{75,5}{1 + 0,001984 \cdot 75,9} = 65,7 \frac{W}{m^2K} \quad (11.52)$$

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = 0,62 \cdot 1 \cdot 0,0032 + 0,000 = 0,001984 \frac{m^2K}{W} \quad (11.53)$$

### TEPLOTNÍ SPÁD

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(381,4 - 201,8) - (287,4 - 170,0)}{2,3 \cdot \log \frac{381,4 - 201,8}{287,4 - 170}} = 146,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.54)$$

### ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA

$$Q_k^{EKO1} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (11.55)$$

$$Q_k^{EKO1} = \frac{65,7 \cdot 146,4 \cdot 392,33}{3,319} \cdot 10^{-3} = 1137,22 \frac{kJ}{kg}$$



**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{EKO1} - Q_b = 1137,22 - 1159,31 = -22,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (11.56)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b} = \frac{-22,09}{1159,31} \cdot 100 = -1,91 \% \quad (11.57)$$

**12 OHŘÍVÁK VZDUCHU****12.1 ROSNÝ BOD**

Teplota rosného bodu podle Verhoffa

$$t_r = \frac{1000}{(1,7842 + 0,0269 \cdot \log p_w - 0,1029 \cdot \log p_s + \frac{0,0329 \cdot \log p_w \cdot \log p_w}{+0,0329 \cdot \log p_w \cdot \log p_w}) - 273} \quad (12.1)$$

kde  $p_s$  – parciální tlak  $H_2O$  ve spalínách (odpovídá objemovému zlomku),  $p_s$  – parciální tlak  $SO_2$  ve spalínách (odpovídá objemovému zlomku) vynásobený konverzí 2 % (vyjadřuje konverzi  $SO_2$  na  $SO_3$ ).

$$p_w = \frac{0,6551}{9,2534} = 0,0708 \text{ atm} \quad (12.2)$$

$$p_s = 0,02 \cdot \frac{0,027}{9,2534} = 5,789 \cdot 10^{-6} \text{ atm} \quad (12.3)$$

$$t_r = \frac{1000}{(1,7842 + 0,0269 \cdot \log 0,0708 - 0,1029 \cdot \log 5,789 \cdot 10^{-6} + \frac{0,0329 \cdot \log 0,0708 \cdot \log 5,789 \cdot 10^{-6}}{+0,0329 \cdot \log 0,0708 \cdot \log 5,789 \cdot 10^{-6}}) - 273} = 128,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**12.2 TRUBKOVÝ OHŘÍVÁK VZDUCHU**

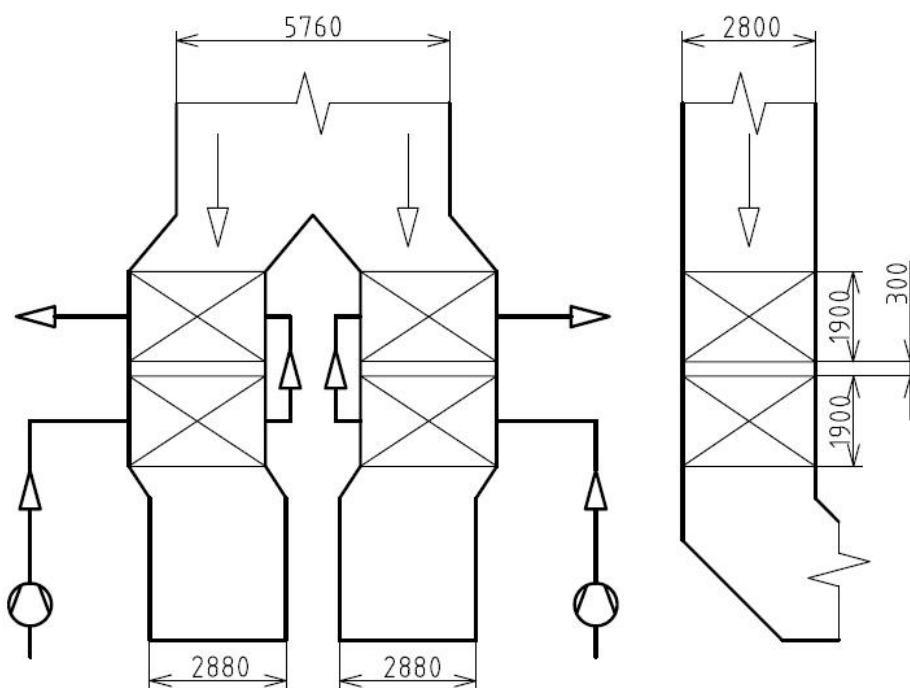
Vzduch se ohřívá v jednostupňovém dvoudílném trubkovém ohříváku vzduchu s vystřídáním uspořádáním trubek.

Tab. 12-1

	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]		entalpie [kJ/kg]	
	vstupní parametry vzduchu	$t_{vz}^{IN}$	30	$I_{vz}^{IN}$
výstupní parametry vzduchu	$t_{vz}^{OUT}$	200	$I_{vz}^{OUT}$	1834,98
parametry spalín před OVZ	$t_{sp}^{IN}$	287,4	$I_G$	3580,88
parametry spalín za OVZ	$t_{sp}^{OUT}$	141,5	$I_H$	1798,84

Tab. 12-2

vnější průměr trubky	$D$	32 mm
tloušťka stěny	$s_{tr}$	1,5 mm
vnitřní průměr trubky	$d$	29 mm
délka trubek 1 dílu	$l$	1900 mm
střední průměr trubky	$d_{stř}$	30,5 mm
počet trubek v 1 řadě	$n_{tr}$	88
počet řad	$n_{ř}$	78
celkový počet trubek	$n$	6864



Obr. 12-1 Ohřívák vzduchu

## TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ SPALIN

$$Q_b = \varphi \cdot (I_G - I_H + \Delta I) \quad (12.4)$$

$$\Delta I = \Delta \alpha \cdot I_{vzmin} = 0,04 \cdot 273,29 = 10,93 \frac{kJ}{kg} \quad (12.5)$$

$$Q_b = 0,993 \cdot (3580,88 - 1798,84 + 10,93) = 1780,32 \frac{kJ}{kg}$$

**TEPELNÁ BILANCE NA STRANĚ VZDUCHU**

$$Q_b = (\beta''_{ovz} + \Delta\alpha_{ovz}) \cdot (I''_{vzmin} - I'_{vzmin}) \quad (12.6)$$

$\beta''_{ovz}$  – součinitel přebytku vzduchu na výstupu z ohříváku vzduchu na straně vzduchu,  $\Delta\alpha_{ovz}$  – přísávání falešného vzduchu v ohříváku vzduchu;  $I''_{vzmin}, I'_{vzmin}$  – entalpie min. mn. vzduchu v závislosti na teplotě vzduchu na výstupu a vstupu OVZ

$$Q_b = (1,1 + 0,04) \cdot (1834,98 - 273,29) = 1780,32 \frac{kJ}{kg} \quad (12.7)$$

**Plocha trubek 1 dílu**

$$S_1 = \pi \cdot d_{stř} \cdot l \cdot n = \pi \cdot \frac{30,5}{1000} \cdot \frac{1900}{1000} \cdot \frac{6864}{1000} = 1249,63 m^2 \quad (12.8)$$

**Celková plocha trubek**

$$S = 2 \cdot S_1 = 2 \cdot 1249,63 = 2499,26 m^2 \quad (12.9)$$

**Minimální příčná rozteč**

$$s_{1min} = \left(1 + \frac{20}{d}\right) \cdot d = \left(1 + \frac{20}{32}\right) \cdot 32 = 52 mm \quad (12.10)$$

**Příčná rozteč**

$$s_1 = (1,4 \div 2,0) \cdot d = 44,8 \div 64 mm \quad (12.11)$$

$$s_1 = 64 mm$$

**Úhlopříčná rozteč**

$$s_{\acute{u}} = \frac{s_1 + d}{2} = \frac{64 + 32}{2} = 48 mm \quad (12.12)$$

**Podélná rozteč**

$$s_2 = \sqrt{\left(\frac{s_{\acute{u}}}{1}\right)^2 - \left(\frac{s_1}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{48}{1}\right)^2 - \left(\frac{64}{2}\right)^2} = 35,8 mm \quad (12.13)$$

**Kontrola šířky**

$$1,5 \cdot s_1 + (n_{tr} - 1) \cdot s_1 = 1,5 \cdot 64 + (89 - 1) \cdot 64 = 5664 mm \quad (12.14)$$

$$5664 mm < 5760 mm$$

**Kontrola hloubky**

$$(n_f - 1) \cdot s_2 = (78 - 1) \cdot 35,8 = 2754,8 mm \quad (12.15)$$

$$2754,8 mm < 2800 mm$$

**Střední teplota vzduchu**

$$t_v^{stř} = \frac{t_{vz}^{IN} + t_{vz}^{OUT}}{2} = \frac{30 + 200}{2} = 115 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.16)$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{sp}^{stř} = \frac{t_{sp}^{IN} + t_{sp}^{OUT}}{2} = \frac{287,4 + 141,5}{2} = 214,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.17)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \cdot \left(1 + \frac{t_{sp}^{stř}}{273}\right) \quad (12.18)$$

$$F_{sp} = \pi \cdot \frac{(d)^2}{4} \cdot n = \pi \cdot \frac{\left(\frac{29}{1000}\right)^2}{4} \cdot 6864 = 4,53 \text{ } m^2 \quad (12.19)$$

$$w_{sp} = \frac{3,319 \cdot 9,0434}{4,53} \cdot \left(1 + \frac{214,4}{273}\right) = 11,82 \frac{m}{s}$$

**Rychlost vzduchu**

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot (\beta''_{OVZ} + \Delta\alpha_{OVZ}) \cdot O_{vzmin}}{F_{vz}} \cdot \left(1 + \frac{t_{vz}^{stř}}{273}\right) \quad (12.20)$$

$$F_{vz} = h \cdot l - n_{tr} \cdot D \cdot l = 5,76 \cdot 1,9 - 88 \cdot \frac{32}{1000} \cdot 1,9 = 5,59 \text{ } m^2 \quad (12.21)$$

$$w_{vz} = \frac{3,319 \cdot (1,1 + 0,04) \cdot 6,9983}{5,53} \cdot \left(1 + \frac{115}{273}\right) = 6,73 \frac{m}{s}$$

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ ZE SPALIN DO STĚNY**

$$\alpha_K = \alpha_1 = c_l \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 1,1 \cdot 41 = 45,1 \frac{W}{m^2K} \quad (12.22)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-5 a 8-6 na str. 107 a 108 v [1]

**SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ ZE STĚNY DO VZDUCHU**

$$\alpha_K = \alpha_2 = c_z \cdot c_s \cdot c_f \cdot \alpha_N = 1 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 78 = 85,8 \frac{W}{m^2K} \quad (12.23)$$

Hodnoty součinitelů určeny pomocí nomogramů na obr. 8-4 na str. 106 v [1]

**SOUČINTEL PROSTUPU TEPLA**

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,85 \cdot \frac{45,1 \cdot 85,8}{45,1 + 85,8} = 25,1 \frac{W}{m^2K} \quad (12.24)$$

kde  $\xi$  – součinitel využití plochy, určen pomocí tab. 8-2 na str. 128 v [1]

**TEPLOTNÍ SPÁD**

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = \psi \cdot \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \quad (12.25)$$

kde  $\psi$  – součinitel přechodu od protiproudu k složitější kombinaci proudění, určen pomocí nomogramu na obr. 8-24 na str 134 v [1], pro tento nomogram je vypočítat následující parametry:

$$P = \frac{\tau_m}{\vartheta' - t'} = \frac{287,4 - 141,5}{287,4 - 30} = 0,57 \quad (12.26)$$

$$P = \frac{\tau_v}{\tau_m} = \frac{200 - 30}{287,4 - 141,5} = 1,17 \quad (12.27)$$

$$\Rightarrow \psi = 0,94$$

$\Delta t_{pr}$  – teplotní spád při protiproudu podle daných konečných teplot obou médií [°C], určí se z následujícího vzorce:

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{2,3 \cdot \log \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{(141,5 - 30) - (287,4 - 200)}{2,3 \cdot \log \frac{141,5 - 30}{287,4 - 200}} = 99,1 \text{ °C} \quad (12.28)$$

kde  $\Delta t_v$  – teplotní spád na tom konci výhřevné plochy, kde je větší [°C],  $\Delta t_m$  – teplotní spád menší na druhém konci [°C]

$$\Delta t = 0,94 \cdot 99,1 = 93,1 \text{ °C}$$

**ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA**

$$Q_k^{OVZ} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} \quad (12.29)$$

$$Q_k^{OVZ} = \frac{25,1 \cdot 93,1 \cdot 2499,26}{3,319} \cdot 10^{-3} = 1761,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**KONTROLA**

$$\Delta Q = Q_k^{OVZ} - Q_b = 1761,88 - 1780,32 = -18,44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (12.30)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_b} = \frac{-18,44}{1780,32} \cdot 100 = -1,04 \% \quad (12.31)$$

## 13 KONTROLA TEPELNÉ BILANCE

Výpočet je zakončen kontrolou tepelné bilance, kdy rozdíl v tepelné bilanci  $\Delta Q$  od přivedeného tepla  $Q_p^p$  nesmí být větší než 0,5 %.

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_k - \sum Q_i \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) \quad (13.1)$$

kde  $\sum Q_i$  – součet bilančních tepel všech výhřevných ploch na straně spalin kromě ohříváku vzduchu [kJ/kg], což také odpovídá rozdílu entalpií spalin  $I_U$  a  $I_G$ .

$$\begin{aligned} \Delta Q &= 26665,5 \cdot \frac{91,48}{100} - (28577,52 - 3580,88) \cdot \left(1 - \frac{2,17}{100}\right) \\ \Delta Q &= -61,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \Delta &= \frac{\Delta Q}{Q_p^p} = \frac{-61,18}{26665,5} \cdot 100 = -0,23 \% \end{aligned} \quad (13.2)$$

### PODMÍNKA SPLNĚNA

## 14 DENITRIFIKACE

Při snižování emisí oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) se využívají primární a sekundární opatření. Primární opatření mají za cíl předcházet vzniku  $\text{NO}_x$ . Využití primárních opatření při návrh kotle bylo popsáno v kapitole 5 Návrh spalovací komory. Úlohou sekundárních opatření je snižovat emise  $\text{NO}_x$ , které již při spalovacím procesu vznikly. Pro dostatečné snížení emisí  $\text{NO}_x$  u navrhovaného kotle bude nutné využít také sekundární opatření. Sekundární opatření představují chemické odbourávání  $\text{NO}_x$ . Existují 2 provozní způsoby: redukční a oxidační. Pro redukci se používají 2 metody, a to selektivní nekatalytická redukce (SNCR) a selektivní katalytická redukce (SCR). Níže jsou popsány obě metody, shrnuty výhody a nevýhody zpracované na základě [4] a firemních materiálů poskytnutých odborným konzultantem. Na konci kapitoly jsou uvedeny důvody pro volbu daného řešení.

### 14.1 SNCR

Metoda selektivní nekatalytické redukce používá vstřik redukčního činidla v plynném skupenství (čpavek) nebo ve vodním roztoku (močovina, čpavková voda) do spalin v oblasti vysokých teplot. Optimální rozmezí reakčních teplot pro čpavek je 950 až 1050 °C, pro močovinu je toto rozmezí 1000 až 1150 °C. Dodržení teplotního rozmezí je důležité, jelikož např. při použití čpavku dochází při teplotách spalin nad 1100 °C k jeho oxidaci a tak se tvoří další  $\text{NO}_x$ , na druhé straně při teplotách pod 850 °C dochází k nárůstu množství čpavku, který neprošel reakcí (čpavkový skluz). Aby bylo dosaženo optimálního snížení emisí  $\text{NO}_x$  s minimálním čpavkovým skluzem, je potřeba rovnoměrně dávkovat redukční činidlo do proudu spalin a zajistit dokonalé smísení v daném teplotním pásmu. V závislosti na výkonu kotle se může vhodné teplotní okno značně pohybovat, což zapříčiní obtížné dosažení rovnoměrné distribuce reagentu a je nutné instalovat několik úrovní vstřiku.

Výhody:

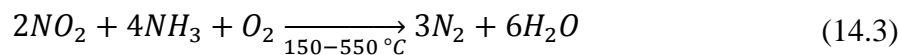
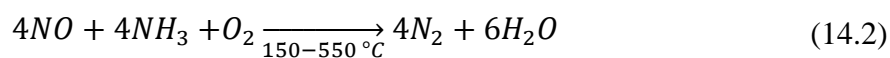
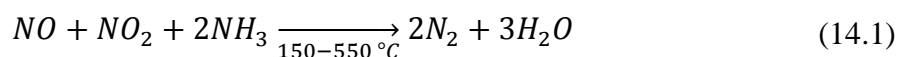
- + Nízké investiční náklady
- + Běžně dostupná technologie
- + Snadná instalace vybavení na stávající kotel, nízká prostorová náročnost
- + Vhodné jako kombinace s primárními opatřeními.

Nevýhody:

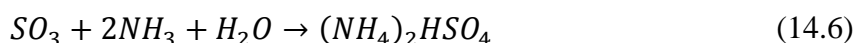
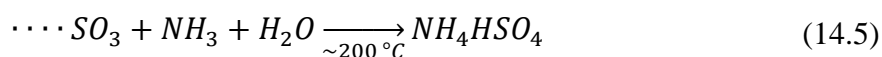
- Nízká účinnost redukce (obecně 30-60 %) => vhodné po nízkou hladinu emisí před redukcí
- Omezení pro použití paliva s ohledem na obsah  $N^{\text{daf}}$
- Vyšší spotřeba reagentu
- Nedokonalá reakce s následným unikem čpavku => může vést ke tvorbě siřičitanu amonného a jeho nánosům na výhřevných plochách kotle
- V místě vstřiku vyžadován homogenní obsah  $O_2$  po průřezu spalovací komory (obvykle požadavek  $O_2 > 1,5 \%$  v min. 75 % průřezu spalovací komory)
- Nutné pásmo vysokých teplot v oblasti vstřiku
- Nutnost úprav membránových stěn, aby byly vytvořeny průchody pro vstřikovací zařízení

## 14.2 SCR

Metoda selektivní katalytické redukce využívá vstřik redukčního činidla (čpavek nebo močovina) do proudu spalin a následnou redukcí  $NO_x$  na povrchu katalyzátoru. Při použití čpavku probíhá na povrchu katalyzátoru reakce podle následujících rovnic:



Kromě zmíněných hlavních reakcí probíhají ještě reakce vedlejší, které jsou nežádoucí:



Úroveň konverze  $SO_2$  na  $SO_3$  je ovlivněna především provozní teplotou a obsahem vanadu v katalyzátoru. Teplota katalyzátoru je velmi důležitá pro průběh reakcí. Optimální teplota se nachází v rozmezí 300 až 400 °C. Katalyzátory se skládají

z modulů. Prvky, ze kterých jsou vytvořeny moduly, mohou být deskové nebo voštinové. Od katalyzátoru požadujeme tyto vlastnosti:

- velká aktivita ve velkém rozsahu teplot
- selektivita
- nízký stupeň konverze na  $SO_2$  na  $SO_3$
- odolnost proti  $H_2SO_4$
- odolnost proti abrazi
- nízká tlaková ztráta
- dlouhá životnost

Životnost katalyzátoru závisí na charakteristice paliva, koncentraci  $NO_x$  na vstupu do katalyzátoru, podílu redukce  $NO_x$ , poměru  $NH_3/NO$ , povoleném skluzu, na jeho kapacitě a na provozu zařízení. Životnost katalyzátoru lze prodloužit jeho regenerací.

Výhody SCR:

- + Vysoká účinnost redukce
- + Běžně dostupná technologie
- + Vhodné i pro vyšší vstupní hladinu emisí a také umožňuje spalování paliva s vyšší hodnotou  $N^{daf}$
- + Nízká spotřeba reagentu (obvykle o 50 % méně než u SNCR)

Nevýhody SCR:

- Vyšší investiční náklady
- Může dojít ke snížení účinnosti redukce v důsledku poničení katalyzátoru kvůli popílku ve spalinách
- Nutné pásmo nízkých teplot pro umístění katalyzátoru
- Nutnost posouzení stávajících spalinových ventilátorů kvůli tlakové ztrátě katalyzátoru
- Nutnost kontroly stavu katalyzátoru a jeho včasné regenerace nebo výměny
- Větší prostorové nároky pro zástavbu katalyzátoru, úprava tahu kotle
- Zatížení konstrukce kotelny kvůli hmotnosti katalyzátoru



Pro SCR existují 3 základní konfigurace:

Uspořádání ve vysokoprašném prostředí – reaktor s katalyzátorem je umístěn mezi dodatkové výhřevné plochy kotle. Katalyzátor je vystaven větší abraze a kvůli tomu má nižší životnost. Nutné počítat s prostorem pro zástavbu. U tohoto řešení není potřebný předehřev spalin, protože je katalyzátor umístěn ve vhodném teplotním pásmu. V mnoha aplikacích vychází toto řešení jako nákladově efektivní a používá se nejčastěji.

Uspořádání v nízkoprašném prostředí – alternativa předchozí varianty, kde však spaliny projdou nejdříve přes vysokoteplotní odlučovač a poté jdou do reaktoru s katalyzátorem. Katalyzátor je méně vystaven abrazi, ale kvůli zástavbě vysokoteplotního odlučovače je tato konfigurace náročná z hlediska prostoru a financí.

Uspořádání pro koncové umístění – spaliny projdou kotlem, odlučovačem, odsířením a poté prochází reaktorem s katalyzátorem. Katalyzátor je méně vystaven abrazi, ale je nutné ohřívat spaliny před katalyzátorem.

### 14.3 POPIS POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Pro navrhovaný kotel byla zvolena varianta SCR zejména kvůli vysoké účinnosti redukce emisí  $\text{NO}_x$ . Kvůli nákladové efektivnosti bylo vybráno uspořádání pro vysokoprašné prostředí. S požadavkem na návrh katalyzátoru jsem se obrátil na odborného konzultanta, který navrhl katalyzátor tak, aby bylo dosaženo emisí  $\text{NO}_x$  na hodnotě  $190 \text{ mg/m}^3$  pro splnění emisního limitu  $200 \text{ mg/m}^3$ .

Pro skladování reagentu se používá nádrž, do které lze dočerpávat z cisterny dopravované nákladním automobilem. Směšovací vzduch je odebírán z potrubí spalovacího vzduchu před ohřívákem vzduchu. Vzduch se pomocí elektrického ohříváče ohřeje na teplotu potřebnou pro odpaření reagentu. Ve směšovací zařízení dojde k odpaření reagentu v ohřátém proudu vzduchu. Rozprašení reagentu je zajištěno stlačeným vzduchem. Pro vstřík směsi do proudu spalin je využito trysek rozmístěných v mříži. Mříž je umístěna za obratovou komorou v horní části druhého tahu kotle. Její výška je 300 mm.

Rozdělení ekonomizéru bylo vytvořeno vhodné teplotní okno pro umístění katalyzátorů. Při jmenovitém výkonu kotle je teplota spalin za ekonomizérem 2 (tzn. před katalyzátorem)  $381,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dále je výhodou promísení spalin s reagentem při proudění spalin kolem trubek ekonomizéru 2.

Katalyzátor se skládá z 2 vrstev o výšce 1500 mm, které v průřezu zabírají celý tah druhý tahu kotle  $5760 \times 2800 \text{ mm}$ . Mezi vrstvami katalyzátoru je mezera 1800 mm umožňující vysunutí vrstvy katalyzátoru a následnou demontáž a poté instalaci nového nebo regenerovaného katalyzátoru.

## 15 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout kotel na spalování černého uhlí, který by byl zastaven do stávající kotelny tak, aby měl co největší parní výkon. Parametry páry 540 °C a 9,4 MPa byly dány navazujícími technologiemi. Bylo dosaženo parního výkonu kotle 108 t/h.

Kotel na spalování černého uhlí je proveden jako vysokotlaký, granulační, bubnový s přirozenou cirkulací. Příprava uhelného prášku se koná ve stávajícím mlecím okruhu s 2 trubnatými mlýny a zásobníkem prášku.

Spalovací komora se skládá z membránových stěn s trubkami o průměru 60,3 mm. Rozteč trubek membránové stěny je 80 mm. Spalovací komora má čtvercový průřez 5760x5760 mm. Ve spodní části spalovací komory je umístěna výsypka popílku.

V rozích v dolní části ohniště se nachází 4 bloky nízkoemisních práškových hořáků. Každý hořákový blok se skládá z 2 hořáků na uhlí a 1 hořáku zapalovacího a stabilizačního na zemní plyn, jenž se nachází mezi dvěma uhelnými hořáky. Hořáky jsou v bloku umístěny nad sebou. Hořáky jsou umístěny tak, aby plamen směřoval tangenciálně do středu spalovací komory. Primární směs se do každého hořáku dopravuje samostatným potrubím, což umožňuje vypnutí nebo zapnutí jednotlivých hořáků podle potřeby.

V čelní stěně ohniště jsou 2 brýdové hořáky, do kterých jsou zavedeny brýdy z odlučovače uhelného prášku a sekundární vzduch. Dále jsou pro účel zapálení kotle a stabilizace ve spalovací komoře umístěny zapalovací hořáky na LTO.

Spalování v rohových hořácích probíhá s mírnou podstechiometrií ( $\alpha=0,9$ ). Hořáky mají odstupňovaný přívod vzduchu. Zbytek spalovacího vzduchu je zaveden v horní části spalovací komory v oblasti 2 až 3 metry pod hranicí konce spalovací komory (dohořivací vzduch). Dýzy jsou umístěny tak, aby bylo zajištěno optimální rozmístění vzduchu a pokrytí provozního výkonového pásu kotle.

Sytá pára z bubnu je odváděna do přehříváku, který je rozdělen na 4 části jdoucí sériově za sebou. Zapojení přehříváků je následující:

- Přehřívák 1 (PP1) – stropní přehřívák – sestává z membránové stěny na stropě kotle, který končí před obratovou komorou. Dále pokračuje jako membránové stěny po bocích horizontálního tahu.
- Přehřívák 2 (PP2) – konvekční přehřívák – protiproudý přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek, který se nachází v horizontálním tahu
- Přehřívák 3 (PP3) – deskový přehřívák – polosálavý přehřívák umístěný za koncem ohniště
- Přehřívák 4 (PP4) – výstupní přehřívák – souprroudý přehřívák s vystřídáním uspořádáním trubek, který se dispozičně nachází za PP3 a před mříží

Regulace teploty přehřáté páry se provádí vstřikem napájecí vody, která je odebírána před ekonomizérem. První vstřík (4 % z napájecí vody) se zavádí před deskový přehřívák (PP3). Druhý vstřík (taktéž 4 % z napájecí vody) se zavádí před výstupní přehřívák (PP4).

V horizontálním tahu se nachází výsypka, kterou se zavádí popílek do mokrého vynašeče popílku. Druhý tah kotle je proveden jako svařovaný plechový kanál. Tento kanál je s membránovými stěnami horizontálního tahu spojen přes člen, který umožňuje teplotní dilataci.

Za obratovou komorou se nachází mříž pro vstřik reagentu pro SCR. Ekonomizér je rozdělen na 2 části a mezi jednotlivými částmi jsou instalovány 2 vrstvy katalyzátoru pro snížení emisí  $\text{NO}_x$  na hodnotu  $190 \text{ mg/m}^3$ . Ekonomizér je rozdělen, protože bylo potřeba dosáhnout před katalyzátorem optimální teploty pro redukci. Dále je výhodou promísení spalin s reagentem při proudění spalin kolem trubek ekonomizéru 2. Mezi vrstvami katalyzátoru je mezera umožňující vysunutí vrstvy katalyzátoru a následnou demontáž a poté instalaci nového nebo regenerovaného katalyzátoru.

Ve spodní části druhého tahu se nachází jednostupňový dvoudílný trubkový ohřívák vzduchu. Druhý tah je v místě nad ohřívákem vzduchu rozdělen na 2 části. Díky rozdělení se výstupy z ohříváku vzduchu nacházejí v pozici, kdy je snadno realizovatelné rozdělení spalovacího vzduchu do jednotlivých hořáků. Dále rozdělený tah umožňuje odvod spalin kotle mezi sloupy kotelny, což by nebylo možné při zachování jednodílného konce druhého tahu.

Při jmenovitém výkonu kotle mají spaliny odcházející z kotle teplotu  $141,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výpočtem byla určena teplota rosného bodu  $128,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při snížení výkonu kotle a následném poklesu teploty spalin za kotlem bude potřeba využít parní ohříváky vzduchu, aby se zvedla vstupní teplota spalovacího vzduchu do ohříváku vzduchu a nedocházelo tak ke kondenzaci vodních par ve spalinách na studeném konci ohříváku vzduchu.

Součástí tepelného návrhu kotle bylo také vytvoření schématu tlakového systému kotle a výpočtového projektu s dispozičním uspořádáním výhřevných ploch. Také bylo vytvořeno schéma zapojení mlecího okruhu. Uvedené části jsou v přílohách diplomové práce.

Tab. 15-1

Rozteče a průměry trubek hlavních výhřevných ploch	$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	D [mm]	d [mm]
Přehřívák 3	720	44	38	26,8
Přehřívák 4	160	65	38	26,8
Přehřívák 2	160	60	38	26,8
Ekonomizér 2	70	42	28	16,8
Ekonomizér 1	70	42	28	16,8
Ohřívák vzduchu	64	35,8	32	29

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0426-4.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků: podklady pro tepelný výpočet*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-01-03757-7.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla: podklady pro tepelný výpočet*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-802-1447-707.
- [4] SKÁLA, Zdeněk. *Ekologie v energetice*. Brno: PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0477-9.
- [5] firemní zdroje poskytnuté odborným konzultantem
- [6] SKÁLA, Zdeněk. *Palivové hospodářství*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1987.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\alpha$	[-]	součinitel přebytku vzduchu
$\alpha_1$	$[W/m^2K]$	součinitel přestupu tepla na straně spalin
$\alpha_2$	$[W/m^2K]$	součinitel přestupu tepla na straně média
$\Delta$	[%]	odchylka tepelné bilance
$\Delta\alpha_0$	[-]	změna přebytku vzduchu přísáváním v ohništi
$\Delta t$	$[^{\circ}C]$	střední logaritmický teplotní spád
$\varepsilon$	[-]	součinitel zanesení výhřevné plochy
$\eta_k$	[%]	tepelná účinnost kotle
$\vartheta_a$	$[^{\circ}C]$	teoretická teplota plamene
$\vartheta_0$	$[^{\circ}C]$	teplota na konci ohniště
$\lambda$	$[W/m^2K]$	součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	$[g/m^3]$	koncentrace popílku ve spalinách
$\mu$	$[Ns/m^2]$	součinitel dynamické viskozity
$\nu$	$[m^2/s]$	součinitel kinematické viskozity
$\xi$	[-]	součinitel zanesení
$\sigma_1$	[-]	poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[-]	poměrná podélná rozteč

$\tau_v$	[°C]	celkový rozdíl teplot toho média, kde je větší
$\tau_m$	[°C]	celkový rozdíl teplot toho média, kde je menší
$\varphi$	[%]	relativní vlhkost vzduchu
$\varphi$	[-]	součinitel uchování tepla
$\psi$	[-]	součinitel tepelné efektivity
$a$	[-]	stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin
$a_0$	[-]	stupeň černosti ohniště
$a_{pl}$	[-]	stupeň černosti plamene
$A^r$	[%]	procento popelovin ve vzorku paliva
$b$	[m]	šířka tahu kotle
$B_0$	[-]	Boltzmannovo číslo
$c_{H_2O}$	[kJ/kgK]	měrné teplo vodní páry
$c_p$	[kJ/kgK]	měrné teplo paliva
$c_s$	[kJ/kgK]	měrné teplo suchého vzduchu
$c_s$	[%]	podíl popela ve škváře
$c_s$	[-]	součinitel opravy na uspořádání
$c_{\dot{u}}$	[%]	podíl popela v úletu
$c_z$	[-]	součinitel opravy na počet podélných řad
$d$	[mm]	vnitřní průměr trubky
$D$	[mm]	vnější průměr trubky
$d_e$	[mm]	ekvivalentní průměr
$f$	[-]	součinitel vlhkosti
$F_p$	[m <sup>2</sup> ]	světlý průřez pro páru
$F_{sp}$	[m <sup>2</sup> ]	světlý průřez pro spaliny
$F_v$	[m <sup>2</sup> ]	světlý průřez pro vodu
$F_{vz}$	[m <sup>2</sup> ]	světlý průřez pro vzduch
$F_{\dot{u}s}$	[m <sup>2</sup> ]	účinná sálavá plocha stěn ohniště
$\bar{q}$	[kW/m <sup>2</sup> ]	střední tepelné zatížení stěn ohniště
$I$	[kJ/kg]	entalpie
$I_0$	[kJ/kg]	entalpie spalin na konci ohniště
$I_p$	[kJ/kg]	entalpie popílku
$I_{sp}$	[kJ/kg]	entalpie spalin

$I_{spmin}$	[kJ/kg]	entalpie minimálního množství spalin
$I_u$	[kJ/kg]	užitečné teplo uvolněné v ohništi
$I_{vzmin}$	[kJ/kg]	entalpie minimálního množství vzduchu
$I'_{vzmin}$	[kJ/kg]	entalpie min. množství nasávaného studeného vzduchu
$I''_{vzmin}$	[kJ/kg]	entalpie min. množství horkého vzduchu
$k$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel prostupu tepla
$M_{pp}$	[kg/s]	parní výkon kotle
$M_p$	[kg/s]	množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pv}$	[kg/s]	množství paliva skutečně spáleného
$M_{vs}$	[kg/s]	množství vstříku
$n$	[–]	počet trubek/hadů
$O_{Ar}$	[m <sup>3</sup> /kg]	objem Ar
$O_{CO_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	objem CO <sub>2</sub>
$O_{H_2Omin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální objem vodní páry
$O_{N_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	objem N <sub>2</sub>
$O_{O_2min}$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální objem kyslíku
$O_{SO_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	objem SO <sub>2</sub>
$O_{sp}$	[m <sup>3</sup> /kg]	skutečné množství spalin
$O_{spmin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální množství spalin
$O_{vzmin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální množství vzduchu
$p$	[MPa]	tlak v ohništi
$p''$	[MPa]	absolutní tlak vodní páry
$p_c$	[MPa]	celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu
$Pr$	[–]	Prandtlovo číslo
$Q_i^r$	[kJ/kg]	výhřevnost paliva
$Q_p^p$	[kJ/kg]	teplo přivedené do kotle
$Q_{vz}$	[kJ/kg]	teplo přivedené do kotle se vzduchem
$r_{CO_2}$	[–]	objemové části tříatomových plynů
$r_{H_2O}$	[–]	objemová část vodní páry
$r_{sp}$	[–]	součet objemových částí
$s$	[mm]	účinná tloušťka sálavé vrstvy
$s_1$	[mm]	příčná rozteč trubek

$s_2$	[mm]	podélná rozteč trubek
$S$	[m <sup>2</sup> ]	povrch
$t_p^{stř}$	[°C]	střední teplota páry
$t_{sp}^{stř}$	[°C]	střední teplota spalin
$T_a$	[K]	absolutní teplota nechlazeného plamene
$T_0$	[K]	absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště
$T_z$	[K]	absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn
$v$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem
$V_{H_2O}$	[%]	podíl objemu vodní páry
$V_0$	[m <sup>3</sup> ]	objem ohniště
$w_p$	[m/s]	rychlost proudění páry
$w_{sp}$	[m/s]	rychlost proudění spalin
$w_{vz}$	[m/s]	rychlost proudění vzduchu
$W^r$	[%]	obsah vody v palivu
$x$	[–]	úhlový součinitel
$x$	[m]	výška tahu v průřezu
$X_s$	[%]	podíl popela ve škváře
$X_{\dot{u}}$	[%]	podíl popela v úletu
$z_{co}$	[%]	ztráta chemickým nedopalem
$z_c$	[%]	ztráta mechanickým nedopalem
$z_f$	[%]	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$z_{so}$	[%]	ztráta sdílením tepla do okolí
$z_s$	[%]	ztráta komínová

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Schéma kotle s dispozičním uspořádáním výhřevných ploch

Příloha 2 – Diagram voda-pára

Příloha 3 – Schéma mlecího okruhu