



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ UHLÍ A NEBO DŘEVNÍ BIOMASY O PARAMETRECH 200 T/H, 9,3 MPA, 520 °C

STEAM BOILER WITH GRATE FIRING, BURNING COAL OR WOOD BIOMAS 200 T/H,  
9,3 MPA, 520 °C

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JAROSLAV ČECH

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Čech

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

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

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

**Roštový kotel na spalování uhlí a nebo dřevní biomasy o parametrech 200 t / h 9,3 MPa,  
520°C**

v anglickém jazyce:

**Steam boiler with grate firing , burning coal or wood biomas 200 t/ h, 9,3 MPa  
520°C**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracovat tepelný výpočet kotle a rozměrový návrh kotle s uspořádáním výhřevných ploch, který bude respektovat rosný bod spalin.

Cíle diplomové práce:

Návrh moderního kotle, který bude respektovat rosný bod spalin.,  
návrh moderního spalovacího roštu s rozdělením vzduchu na primární a sekundární včetně umístění hubic sek. vzduchu,  
kotel řešte s parním ohřívákem vzduchu do teploty 100 °C,

Seznam odborné literatury:

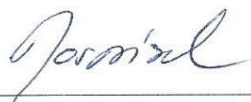
Budaj,F.: Parní kotle, tepelný výpočet, skriptum VUT v Brně,  
Černý ,Teysler, Janeba: Parní kotle,technický průvodce , SNTL Praha 1998,  
Basu,Kefa, Jestin: Boilers and Burners.Springer, New York,Berlin, Heidelberg,2000

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

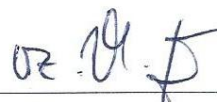
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 14.11.2014





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



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh roštového kotle o výkonu  $200 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ , který bude spalovat hnědé uhlí nebo dřevní štěpku. Celý návrh je rozdělen do několika částí. Pro jednotlivá paliva byly v úvodní části stanoveny stechiometrické vlastnosti a výpočty entalpie spalin a vzduchu. Po výpočtu tepelné bilance a ztrát kotle byla určena účinnost kotle. Následuje návrh jednotlivých výhřevných ploch, který je zakončen kontrolou celkové tepelné bilance kotle. Výpočet je dále doplněn o výkresovou dokumentaci.

## Klíčová slova

Roštový kotel, hnědé uhlí, biomasa, účinnost kotle, výparník, přehřívák, ekonomizér, ohřívák vzduchu

## Abstract

The aim of the work is the design of a grate boiler of  $200 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  output, which will burn brown coal or wood chips. The work is divided into several parts. First, stoichiometric calculation and the calculations enthalpy of flue gases and air are performed. After calculating the heat balance and loss of the boiler was counted boiler efficiency. The design of individual heating surfaces is proposed and at the end are controlled the overall heat balance of the boiler. The calculation is supplemented by drawings.

## Key words

Grate boiler, brown coal, boiler efficiency, evaporator, super heater, economizer, air heater



### **Bibliografická citace:**

ČECH, J. *Roštový kotel na spalování uhlí anebo dřevní biomasy o parametrech 200 t / h 9,3 MPa, 520°C*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 249 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..





**Čestné prohlášení:**

Tímto prohlašuji, že jsem předloženu diplomovou práci na téma „Roštový kotel na spalování uhlí anebo dřevní biomasy o parametrech 200 t/h, 9,3 MPa, 520 °C“ vypracoval samostatně, na základě odborných konzultací s využitím uvedené literatury.

v Brně dne 25. května 2015

---

Bc. Jaroslav Čech



**Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňkovi Skálovi, CSc. a panu Ing. Mirko Hudečkovi, CSc. za odborné vedení a cenné připomínky při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině za veškerou podporu v průběhu mého vysokoškolského studia.



## Obsah

1	Úvod .....	21
1.1	Cíle diplomové práce.....	21
1.2	Biomasa .....	21
1.3	Hnědé uhlí .....	22
1.4	Regulace teploty a množství spalovacího vzduchu .....	22
2	Stechiometrie spalin.....	23
2.1	Hnědé uhlí .....	23
2.1.1	Skutečné množství vzduchu a spalin .....	25
2.1.2	Entalpie vzduchu a produktů spalování .....	26
2.2	Dřevní štěpka.....	29
2.2.1	Skutečné množství vzduchu a spalin .....	31
2.2.2	Entalpie vzduchu a produktů spalování .....	32
3	Tepelná bilance kotle .....	35
3.1	Hnědé uhlí .....	35
3.1.1	Teplo přivedené do kotle .....	35
3.1.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	35
3.1.2.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem) .....	36
3.1.2.2	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích .....	36
3.1.2.3	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	36
3.1.2.4	Ztráta sdílením tepla do okolí .....	37
3.1.2.5	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta) .....	37
3.1.2.6	Ztráta nepočitatelná .....	38
3.1.2.7	Tepelná účinnost kotle .....	38
3.1.3	Výrobní teplo páry a množství paliva.....	38
3.1.3.1	Výrobní teplo páry .....	38
3.1.3.2	Množství paliva přivedeného do kotle .....	39
3.1.3.3	Množství skutečně spáleného paliva .....	39
3.2	Dřevní štěpka.....	39
3.2.1	Teplo přivedené do kotle .....	39
3.2.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	40
3.2.2.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem) .....	40
3.2.2.2	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích .....	40
3.2.2.3	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	40

3.2.2.4	Ztráta sdílením tepla do okolí .....	41
3.2.2.5	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta) .....	41
3.2.2.6	Ztráta nepočitatelná.....	42
3.2.2.7	Tepelná účinnost kotle .....	42
3.2.3	Množství paliva .....	42
3.2.3.1	Množství paliva přivedeného do kotle .....	42
3.2.3.2	Množství skutečně spáleného paliva.....	42
4	Výpočet spalovací komory .....	43
4.1	Hnědé uhlí .....	44
4.1.1	Tepelný výpočet ohniště.....	44
4.1.1.1	Teplota spalin na konci ohniště.....	44
4.1.1.2	Užitečné teplo uvolněné v ohništi .....	44
4.1.1.3	Součinitel M.....	45
4.1.1.4	Boltzmannovo číslo.....	45
4.1.1.5	Stupeň černosti ohniště .....	46
4.1.1.6	Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn .....	47
4.2	Dřevní štěpka .....	48
4.2.1	Tepelný výpočet ohniště.....	48
4.2.1.1	Teplota spalin na konci ohniště.....	48
4.2.1.2	Užitečné teplo uvolněné v ohništi .....	48
4.2.1.3	Součinitel M.....	49
4.2.1.4	Boltzmannovo číslo.....	49
4.2.1.5	Stupeň černosti ohniště .....	50
4.2.1.6	Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn .....	51
4.3	Návrh roštu.....	52
4.4	Množství vzduchu na vstupu do spalovací komory .....	52
5	Výpočet konvekčních ploch .....	53
5.1	Zadané hodnoty přehřáté páry.....	53
5.2	Tlakové ztráty a entalpické spády v jednotlivých výhřevných plochách.....	53
5.3	Vstříky a odluh.....	53
5.4	Rozložení tepelných výkonů .....	53
5.4.1	Ohřívák vzduchu – první stupeň AH1 .....	54
5.4.1.1	Hnědé uhlí .....	54
5.4.1.2	Dřevní štěpka .....	54

5.4.2	Ekonomizér – EKO 1.....	54
5.4.3	Ekonomizér – EKO 2.....	55
5.4.4	Ohřívák vzduchu – druhý stupeň AH2 .....	55
5.4.4.1	Hnědé uhlí .....	55
5.4.4.2	Dřevní štěpka .....	55
5.4.5	Ekonomizér – EKO 3.....	56
5.4.6	Výparník .....	56
5.4.7	Přehřívák SH1a.....	57
5.4.8	Přehřívák SH1b.....	57
5.4.9	Přehřívák SH2.....	57
5.4.10	Přehřívák SH3A.....	58
5.4.11	Přehřívák SH3B .....	58
5.4.12	Přehřívák SH4.....	59
5.5	Celkový tepelný výkon.....	60
5.6	Tepelná bilance na straně spalin.....	61
5.6.1	Teploty a entalpie spalin na výstupu z jednotlivých částí DP .....	59
5.7	Pilové diagramy.....	63
5.7.1	Hnědé uhlí.....	63
5.7.2	Dřevní štěpka.....	64
6	Výpočet konvekčních ploch – hnědé uhlí.....	65
6.1	Deskový přehřívák SH3A .....	65
6.1.1	Návrh geometrie .....	65
6.1.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	67
6.1.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	68
6.1.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	69
6.1.5	Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla.....	71
6.1.6	Tepelný výkon deskového přehříváku SH3A.....	72
6.1.7	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	73
	Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek .....	73
	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	73
	Celkový součinitel přestupu tepla.....	73
6.2	Deskový přehřívák SH3B.....	75
6.2.1	Návrh geometrie .....	75
6.2.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	77

6.2.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	78
6.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	79
6.2.5	Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla.....	80
6.2.6	Tepelný výkon deskového přehříváku SH3B .....	82
6.2.7	Výkon paralelních ploch.....	83
6.3	Přehřívák SH4 .....	85
6.3.1	Návrh geometrie .....	85
6.3.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	87
6.3.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	88
6.3.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	89
6.3.5	Tepelný výkon přehříváku SH4.....	91
6.3.6	Výkonu paralelních ploch.....	92
6.4	Přehřívák SH2 .....	94
6.4.1	Návrh geometrie .....	94
6.4.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	96
6.4.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	97
6.4.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	98
6.4.5	Tepelný výkon přehříváku SH2.....	100
6.4.6	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	101
6.4.6.1	Výpočet výkonu paralelních ploch výparnickových trubek .....	101
6.4.6.2	Výpočet paralelní plochy mříže .....	103
6.5	Přehřívák SH1B .....	106
6.5.1	Návrh geometrie .....	106
6.5.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	108
6.5.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	109
6.5.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	110
6.5.5	Tepelný výkon přehříváku SH1B .....	112
6.6	Přehřívák SH1A .....	113
6.6.1	Návrh geometrie .....	113
6.6.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	115
6.6.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	116
6.6.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	116
6.6.5	Tepelný výkon přehříváku SH1A.....	118



6.7	Ekonomizér EKO3 .....	120
6.7.1	Návrh geometrie .....	120
6.7.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	122
6.7.3	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	123
6.7.4	Tepelný výkon přehříváku EKO3.....	125
6.8	Ohřívák vzduchu AH2.....	127
6.8.1	Návrh geometrie .....	127
6.8.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	129
6.8.3	Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu .....	130
6.8.4	Součinitel prostupu tepla .....	131
6.8.5	Tepelný výkon AH2 .....	131
6.9	Ekonomizér EKO2 .....	133
6.9.1	Návrh geometrie .....	133
6.9.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	135
6.9.3	Součinitel přestupu tepla na straně vody .....	137
6.9.4	Součinitel prostupu tepla .....	137
6.9.5	Tepelný výkon EKO2.....	138
6.10	Ekonomizér EKO1 .....	139
6.10.1	Návrh geometrie .....	139
6.10.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	141
6.10.3	Součinitel přestupu tepla na straně vody .....	143
6.10.4	Součinitel prostupu tepla.....	143
6.10.5	Tepelný výkon EKO1 .....	144
6.11	Ohříváku vzduchu AH1.....	145
6.11.1	Návrh geometrie .....	145
6.11.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	147
6.11.3	Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu .....	148
6.11.4	Tepelný výkon AH1.....	149
7	Výpočet konvekčních ploch – dřevní štěpka.....	150
7.1	Deskový přehřívák SH3A .....	150
7.1.1	Návrh geometrie .....	150
7.1.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	152
7.1.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	153
7.1.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	154

7.1.5	Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla.....	156
7.1.6	Tepelný výkon deskového přehříváku SH3A.....	157
7.1.7	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	158
7.2	Deskový přehřívák SH3B.....	160
7.2.1	Návrh geometrie .....	160
7.2.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	162
7.2.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	163
7.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	164
7.2.5	Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla.....	166
7.2.6	Tepelný výkon deskového přehříváku SH3B.....	167
7.2.7	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	168
7.3	Přehřívák SH4 .....	170
7.3.1	Návrh geometrie .....	170
7.3.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	172
7.3.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	173
7.3.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	174
7.3.5	Tepelný výkon přehříváku SH4.....	176
7.3.6	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	177
7.4	Přehřívák SH2 .....	179
7.4.1	Návrh geometrie .....	179
7.4.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	181
7.4.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	182
7.4.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	183
7.4.5	Tepelný výkon přehříváku SH2.....	185
7.4.6	Výpočet výkonu paralelních ploch .....	186
7.4.6.1	Výkon paralelních ploch výparníkových trubek .....	186
7.4.6.2	Výpočet paralelní plochy mříže .....	188
7.5	Přehřívák SH1B .....	191
7.5.1	Návrh geometrie .....	191
7.5.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	193
7.5.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	194
7.5.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	195
7.5.5	Tepelný výkon přehříváku SH1B.....	197

7.6	Přehřívák SH1A .....	198
7.6.1	Návrh geometrie .....	198
7.6.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	200
7.6.3	Součinitele přestupu tepla na straně páry .....	201
7.6.4	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	201
7.6.5	Tepelný výkon přehříváku SH1A.....	203
7.7	Ekonomizér EKO3 .....	205
7.7.1	Návrh geometrie .....	205
7.7.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	207
7.7.3	Součinitel přestupu tepla sáláním .....	208
7.7.4	Tepelný výkon přehříváku EKO3.....	210
7.8	Ohřívák vzduchu AH2.....	211
7.8.1	Návrh geometrie .....	211
7.8.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	213
7.8.3	Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu .....	214
7.8.4	Součinitel prostupu tepla .....	215
7.8.5	Tepelný výkon AH2 .....	215
7.9	Ekonomizér EKO2 .....	217
7.9.1	Návrh geometrie .....	217
7.9.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	219
7.9.3	Součinitel přestupu tepla na straně vody .....	221
7.9.4	Součinitel prostupu tepla .....	221
7.9.5	Tepelný výkon EKO2.....	222
7.10	Ekonomizér EKO1 .....	223
7.10.1	Návrh geometrie .....	223
7.10.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	225
7.10.3	Součinitel přestupu tepla na straně vody .....	227
7.10.4	Součinitel prostupu tepla.....	227
7.10.5	Tepelný výkon EKO1 .....	228
7.11	Ohříváku vzduchu AH1.....	229
7.11.1	Návrh geometrie .....	229
7.11.2	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	231
7.11.3	Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu .....	232
7.11.4	Tepelný výkon AH1.....	233

---

8	Kontroly.....	234
8.1	Hnědé uhlí.....	234
8.1.1	Kontrola výkonu výparníku.....	234
8.1.2	Kontrola výkonu kotle.....	234
8.2	Dřevní štěpka.....	235
8.2.1	Kontrola výkonu výparníku.....	235
8.2.2	Kontrola výkonu kotle.....	235
9	Závěr.....	236
10	Seznam použité literatury.....	237
	Seznam použitých symbolů.....	238
	Seznam obrázků.....	243
	Seznam tabulek.....	245
	Seznam grafů.....	248
	Seznam příloh.....	249

# 1 Úvod

## 1.1 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je tepelný výpočet a rozměrový návrh roštového kotle, který bude respektovat rosny bod spalin. Palivem je hnědé uhlí nebo v případě potřeby biomasa ve formě čisté dřevní štěpky. Palivo bude spalováno na pásovém roštu moderní konstrukce. Celý výpočet návrhu kotle vychází ze zadaných výstupních parametrů přehřáté páry – teplota 520 °C a tlak 9,3 MPa.

Při návrhu výpočtu kotle je potřeba nejprve určit stechiometrické výpočty, které slouží pro zjištění objemu vzduchu potřebného ke spalování jednotky hmotnosti paliva a dále ke zjištění množství spalin, které tímto spálením vzniknou.

Dalším krokem výpočtu je určení tepelných ztrát kotle. Z těchto ztrát se následně určí účinnost kotle a posléze ze získaného výrobního tepla množství skutečně spáleného paliva, rozměry spalovací komory a teploty či entalpie odchozích spalin.

Další část výpočtu tvoří návrh výkonů jednotlivých teplosměnných ploch. Z tohoto návrhu vychází tepelná bilance na straně média, tepelná bilance na straně spalin a výpočet jednotlivých výhřevných ploch.

## 1.2 Biomasa

Biomasa je definována jako veškerá hmota organického původu. V energetice se nejčastěji jedná o dřevo a dřevní odpad, slámu a jiné zemědělské zbytky. Na rozdíl od fosilních paliv lze biomasu obnovovat, a tím ji lze řadit mezi obnovitelné zdroje energie. Efektivní a ekologické využití biomasy má minimální negativní vliv na životní prostředí. Biomasu je možné využívat jak k výrobě ušlechtilých paliv, tak je možné ji využívat přímým spalováním. [4]

### Zdroje biomasy

- biomasa záměrně pěstovaná – rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru
- biomasa odpadní – odpady z živočišné a rostlinné výroby

### Výhody

- obnovitelnost
- relativně dobrá skladovatelnost
- možnost využití odpadního materiálu

### Nevýhody

- nižší výhřevnost
- náklady spojené s přepravou paliva
- před spalováním je třeba biomasu upravit, což zvyšuje cenu získané energie

### 1.3 Hnědé uhlí

Hnědé uhlí, řadí se do skupiny fosilních paliv přírodního původu, patří mezi energeticky důležité střeoevropské suroviny. Nalézá se v menších hloubkách, a proto se těží v povrchových dolech. Tento typ uhlí se používá především k topení, a to jak v domácnostech, tak zejména v tepelných elektrárnách.

Kvalita uhlí jako paliva závisí především na obsahu uhlíku, jehož hodnota u hnědého uhlí činí asi 60 až 75 %. Kromě uhlíku obsahuje také řadu příměsí, zejména různé popeloviny a síry, ale i vody.[5]

#### Výhody

- menší náklady na těžbu
- bohatá naleziště jak v Evropě, tak v ČR

#### Nevýhody

- neobnovitelný zdroj energie
- zdroj škodlivých látek

### 1.4 Regulace teploty a množství spalovacího vzduchu

Spalovací vzduch je do spalovací komory dopravován přes dvoustupňový ohřívák vzduchu. Regulace teploty a množství spalovacího vzduchu je zajištěna odebráním části vzduchu za prvním stupněm ohříváku (AH1) a odvedením této části přímo do spalovací komory pod rošt. Zbývá část vzduchu prochází přes druhý stupeň ohříváku (AH2) a do spalovací komory je přivedena výše jako sekundární vzduch. V případě potřeby je možná regulace veškerého vzduchu pro spalování.

## 2 Stechiometrie spalín

### 2.1 Hnědé uhlí

Tabulka 1: Složení paliva

Výhřevnost [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	W <sub>i</sub> <sup>r</sup> [%]	A <sup>r</sup> [%]	C <sup>r</sup> [%]	H <sup>r</sup> [%]	N <sup>r</sup> [%]	Cl <sup>r</sup> [%]	O <sup>r</sup> [%]	S <sup>r</sup> [%]
23	10	15,0	61,84	2,66	1,34	0,178	7,55	1,43

#### Minimálního množství vzduchu

##### Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

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

$$O_{O_2\min} = \frac{22,39}{100} \left( \frac{61,84}{12,01} + \frac{2,66}{4,032} + \frac{1,43}{32,06} - \frac{7,55}{32} \right)$$

$$O_{O_2\min} = 1,2577 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

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

Tabulka 2: Objemové složení suchého vzduchu v atmosféře

Látka	Objemový podíl x [-]
Kyslík O <sub>2</sub>	0,2100
Dusík N <sub>2</sub>	0,7805
Argon Ar	0,0092
Oxid uhličitý CO <sub>2</sub>	0,0003

$$O_{Vz\min}^s = \frac{1}{x_{O_2}} \cdot O_{O_2\min} = \frac{1}{0,21} \cdot 1,2577 = 5,9890 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-2)$$

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

- φ - relativní vlhkost 60%
- p'' - absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při teplotě vzduchu 25 °C
- p<sub>c</sub> - celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

$$\frac{p''}{p_c - p''} = \frac{3170}{101200 - 3170} = 0,03234 \quad (2-3)$$

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - p''} \quad (2-4)$$

$$V_{H_2O} = 0,60 \cdot 0,03234 = 0,0194 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Součinitel  $f$  vyjadřuje poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry

$$f = 1 + V_{\text{H}_2\text{O}} = 1 + 0,0194 = 1,0194 \quad (2-5)$$

$$O_{\text{vz min}} = f \cdot O_{\text{vz min}}^{\text{s}}$$

$$O_{\text{vz min}} = 1,0194 \cdot 5,9890$$

$$O_{\text{vz min}} = 6,1052 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Minimální množství suchých spalin

$$O_{\text{sp min}}^{\text{s}} = O_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} + O_{\text{Ar}} \quad (2-6)$$

$$O_{\text{sp min}}^{\text{s}} = 1,1480 + 9,7638 \cdot 10^{-3} + 4,6851 + 0,0551$$

$$O_{\text{sp min}}^{\text{s}} = 5,8980 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Jednotlivé objemy při spalování 1kg paliva

- **objem CO<sub>2</sub>**

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^{\text{r}}}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{\text{vz min}}^{\text{s}} \quad (2-7)$$

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{61,84}{12,01} + 0,0003 \cdot 5,9890$$

$$O_{\text{CO}_2} = 1,1480 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **objem SO<sub>2</sub>**

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^{\text{r}}}{32,06} \quad (2-8)$$

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{1,43}{32,06}$$

$$O_{\text{SO}_2} = 9,7638 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **objem N<sub>2</sub>**

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^{\text{r}}}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{\text{vz min}}^{\text{s}} \quad (2-9)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{1,34}{28,016} + 0,7805 \cdot 5,9890$$

$$O_{\text{N}_2} = 4,6851 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$



- **objem Ar**

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{vz \min}^s \quad (2-10)$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 5,9890$$

$$O_{Ar} = 0,0551 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Maximální množství CO<sub>2</sub> ve spalinách**

$$CO_{2 \max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp \min}^s} \cdot 100 \quad (2-11)$$

$$CO_{2 \max} = \frac{1,1480}{5,8980} \cdot 100$$

$$CO_{2 \max} = 19,4642 \%$$

**Minimální objem vodní páry**

$$O_{H_2O \min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{vz \min}^s \quad (2-12)$$

$$O_{H_2O \min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{2,66}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{10,0}{18,016} + (1,0194 - 1) \cdot 5,9890$$

$$O_{H_2O \min} = 0,5361 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Minimální množství vlhkých spalin**

$$O_{sp \min} = O_{sp \min}^s + O_{H_2O \min} \quad (2-13)$$

$$O_{sp \min} = 5,8980 + 0,5361$$

$$O_{sp \min} = 6,4341 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**2.1.1 Skutečné množství vzduchu a spalin**
**Skutečné množství vzduchu s přebytkem  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{vz} = O_{vz \min} \cdot \alpha \quad (2-14)$$

$$O_{vz} = 6,1052 \cdot 1,35$$

$$O_{vz} = 8,2420 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{sp} = O_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vz \min} \quad (2-15)$$

$$O_{sp} = 6,4341 + (1,35 - 1) \cdot 6,1052$$

$$O_{sp} = 8,5711 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Skutečné množství vodní páry s přebytkem vzduchu  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = O_{\text{H}_2\text{O} \min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vz \min}^s \quad (2-16)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5361 + (1,0194 - 1) \cdot (1,35 - 1) \cdot 5,9890$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5768 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Objemové části tříatomových plynů**

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2} + O_{\text{CO}_2}}{O_{sp}} = \frac{9,7638 \cdot 10^{-3} + 1,1480}{8,5710} = 0,1351 \quad (2-17)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{sp}} = \frac{0,5768}{8,5711} = 0,0673 \quad (2-18)$$

**Součet objemových částí tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (2-19)$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{sp}} \cdot \frac{x_p}{100} = \frac{10 \cdot 15,0}{8,5711} \cdot \frac{21}{100} = 3,6751 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2-20)$$

**2.1.2 Entalpie vzduchu a produktů spalování****Následující výpočty jsou uvedeny pro hodnoty  $\alpha = 1,35$  a  $t = 100$  °C****Entalpie minimálního množství spalin**

$$I_{sp \min} = O_{\text{CO}_2} \cdot i_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} \cdot i_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} \cdot i_{\text{N}_2} + O_{\text{H}_2\text{O} \min} \cdot i_{\text{H}_2\text{O}} + O_{\text{Ar}} \cdot i_{\text{Ar}} \quad (2-21)$$

$$I_{sp \min} = 1,1480 \cdot 170 + 9,7638 \cdot 10^{-3} \cdot 191,2 + 4,6851 \cdot 130 + 0,5361 \cdot 150,5 + 0,0551 \cdot 93,07$$

$$I_{sp \min} = 891,9010 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva**

$$I_{sp} = I_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz \min} \quad (2-22)$$

$$I_{sp} = 891,9010 + (1,35 - 1) \cdot 795,9980$$

$$I_{sp} = 1170,5003 \text{ kJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

Tabulka 3: Entalpie základních složek spalin a měrné teplo v závislosti na teplotě

t [°C]	Entalpie složek spalin [kJ·Nm <sup>-3</sup> ]								Měrné teplo	
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	SO <sub>2</sub>	CO	suchý vzduch	H <sub>2</sub> O	c <sub>s</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	c <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
100	131,7	130	170	93,07	191,2	130,2	132,3	150,5	1,300	1,505
200	267	260,7	357,5	186	394,1	261,4	266,2	304,5	1,307	1,522
300	406,8	393,3	558,9	278,8	610,4	395	402,5	462,6	1,317	1,542
400	550,9	528,4	772	371,7	836,5	531,7	541,7	626,3	1,329	1,565
500	698,7	666,1	994,4	464,7	1070	671,6	684,1	795,1	1,343	1,590
600	849,9	807,2	1225	557,3	1310	814,3	829,6	968,8	1,356	1,615
700	1003	951,2	1462	650,2	1554	960,4	978,1	1149	1,371	1,641
800	1159	1097	1705	743,1	1801	1109	1129	1334	1,384	1,668
900	1318	1246	1952	835,7	2052	1260	1283	1526	1,398	1,696
1000	1477	1397	2203	928,2	2304	1413	1439	1723	1,410	1,723
1100	1638	1544	2458	1020	2540	1567	1597	1925	1,421	1,750
1600	2465	2338	3812	1486	3838	2365	2403	2981	1,471	1,876
2000	3138	2978	4844	1857	4890	3008	3065	3925	1,500	1,963

**Entalpie minimálního množství vzduchu**

$$I_{vz \min} = O_{vz \min}^s \cdot (c \cdot t)_{vz} = 5,9890 \cdot 1,3291 \cdot 100 = 795,9980 \text{ kJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \quad (2-23)$$

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,0194 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 12,0631 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-24)$$

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} = 1,3 + 0,0016 \cdot 12,0631 \cdot 1,505 = 1,3291 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2-25)$$

**Entalpie popílku ve spalinách**

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot x_p} \quad (2-26)$$

$$2,0 > \frac{6 \cdot 23000}{41,8 \cdot 21}$$

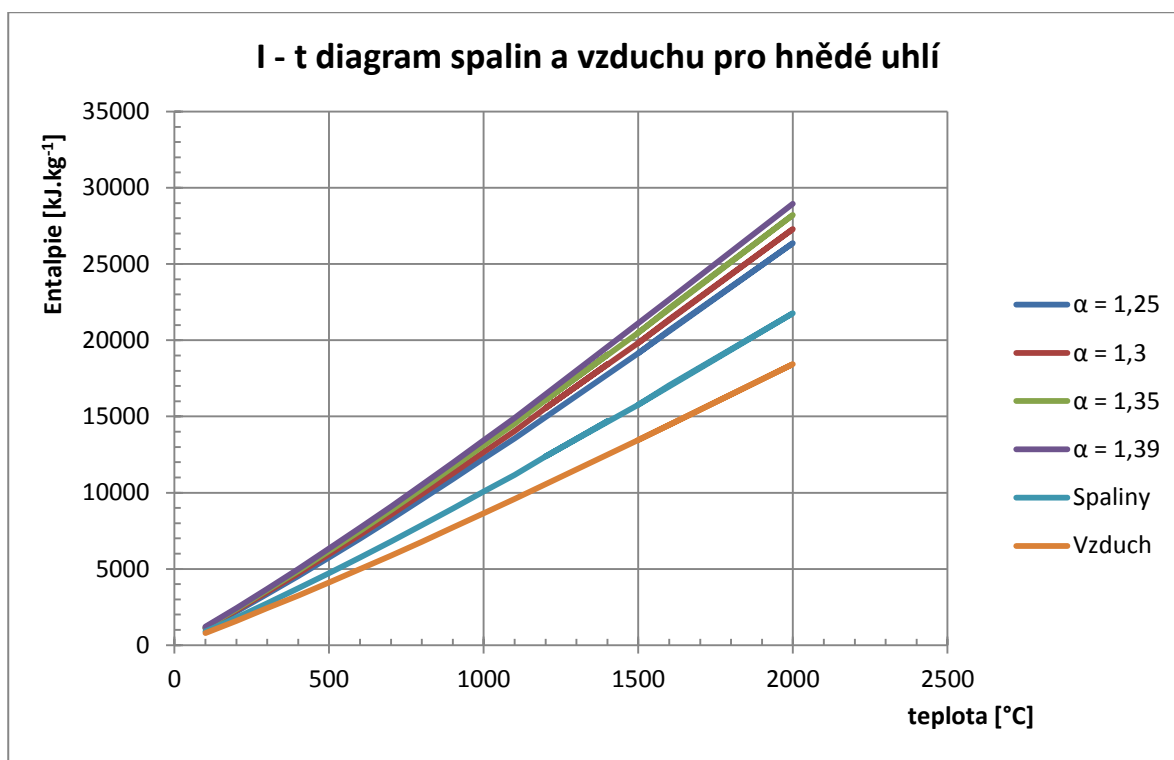
2,0 > 157,21 => jelikož daná nerovnost není splněna, entalpie popílku  $I_p$  není ve spalinách uvažována

**Entalpie spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu**

Pro výpočet entalpií při daných teplotách spalin byly použity hodnoty entalpií a hodnoty měrného tepla uvedené v tab. 3.

Tabulka 4: Entalpie spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu

t [°C]	$I_{sp\ min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_{vz\ min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_{sp} = I_{sp\ min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz\ min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]			
			$\alpha = 1,25$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,35$	$\alpha = 1,39$
100	891,9010	795,9668	1090,8927	1130,6911	1170,4894	1202,3281
200	1809,1545	1600,7112	2209,3323	2289,3679	2369,4035	2433,4319
300	2753,5886	2419,7274	3358,5205	3479,5068	3600,4932	3697,2823
400	3726,2704	3256,1139	4540,2988	4703,1045	4865,9102	4996,1548
500	4724,6217	4113,5103	5752,9992	5958,6747	6164,3503	6328,8907
600	5750,9842	4984,6605	6997,1493	7246,3823	7495,6154	7695,0018
700	6801,8210	5880,4255	8271,9274	8565,9486	8859,9699	9095,1869
800	7870,5815	6785,2687	9566,8987	9906,1621	10245,4256	10516,8363
900	8962,7016	7711,8016	10890,6520	11276,2421	11661,8322	11970,3042
1000	10071,4686	8643,6575	12232,3830	12664,5659	13096,7487	13442,4950
1100	11168,5730	9583,9233	13564,5538	14043,7499	14522,9461	14906,3030
1600	17047,4060	14442,7312	20658,0888	21380,2253	22102,3619	22680,0711
2000	21767,3980	18420,8199	26372,6030	27293,6439	28214,6849	28951,5177



Graf 1: Závislost entalpií spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu

## 2.2 Dřevní štěpka

Tabulka 5: Složení paliva

Výhřevnost [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	W <sub>i</sub> <sup>r</sup> [%]	A <sup>r</sup> [%]	C <sup>r</sup> [%]	H <sup>r</sup> [%]	N <sup>r</sup> [%]	Cl <sup>r</sup> [%]	O <sup>r</sup> [%]	S <sup>r</sup> [%]
16	10,3	2,0	38,78	5,65	0,38	0,018	42,68	0,12

### Výpočet minimálního množství vzduchu

#### Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (2-27)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \left( \frac{38,78}{12,01} + \frac{5,65}{4,032} + \frac{0,12}{32,06} - \frac{42,68}{32} \right)$$

$$O_{O_2 \min} = 0,7389 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

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

$$O_{vz \min}^s = \frac{1}{x_{O_2}} \cdot O_{O_2 \min} = \frac{1}{0,21} \cdot 0,7389 = 3,5186 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-28)$$

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

$$O_{vz \min} = f \cdot O_{vz \min}^s \quad (2-29)$$

$$O_{vz \min} = 1,0194 \cdot 3,5186$$

$$O_{vz \min} = 3,5869 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Minimální množství suchých spalin

$$O_{sp \min}^s = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (2-30)$$

$$O_{sp \min}^s = 0,7198 + 8,1934 \cdot 10^{-4} + 2,7493 + 0,0324$$

$$O_{sp \min}^s = 3,5023 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Jednotlivé objemy při spalování 1kg paliva

- **objem CO<sub>2</sub>**

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{vz \min}^s \quad (2-31)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{38,78}{12,01} + 0,0003 \cdot 3,5186$$

$$O_{CO_2} = 0,7198 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **objem SO<sub>2</sub>**

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} \quad (2-32)$$

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,12}{32,06}$$

$$O_{\text{SO}_2} = 8,1934 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **objem N<sub>2</sub>**

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{\text{vz min}}^s \quad (2-33)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,38}{28,016} + 0,7805 \cdot 3,5186$$

$$O_{\text{N}_2} = 2,7493 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **objem Ar**

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot O_{\text{vz min}}^s \quad (2-34)$$

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot 3,5186$$

$$O_{\text{Ar}} = 0,0324 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

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

$$\text{CO}_2 \text{ max} = \frac{O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{sp min}}^s} \cdot 100 \quad (2-35)$$

$$\text{CO}_2 \text{ max} = \frac{0,7198}{3,5023} \cdot 100$$

$$\text{CO}_2 \text{ max} = 20,5522 \%$$

### Minimální objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{O min}} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{\text{vz min}}^s \quad (2-36)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O min}} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{5,65}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{10,3}{18,016} + (1,0194 - 1) \cdot 3,5186$$

$$O_{\text{H}_2\text{O min}} = 0,8241 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Minimální množství vlhkých spalin**

$$O_{\text{sp min}} = O_{\text{sp min}}^{\text{s}} + O_{\text{H}_2\text{O min}} \quad (2-37)$$

$$O_{\text{sp min}} = 3,5023 + 0,8241$$

$$O_{\text{sp min}} = 4,3264 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**2.2.1 Skutečné množství vzduchu a spalin****Skutečné množství vzduchu s přebytkem  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{\text{vz}} = O_{\text{vz min}} \cdot \alpha \quad (2-38)$$

$$O_{\text{vz}} = 3,5869 \cdot 1,35$$

$$O_{\text{vz}} = 4,8423 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{\text{sp}} = O_{\text{sp min}} + (\alpha - 1) \cdot O_{\text{vz min}} \quad (2-39)$$

$$O_{\text{sp}} = 4,3264 + (1,35 - 1) \cdot 3,5869$$

$$O_{\text{sp}} = 5,5818 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Skutečné množství vodní páry s přebytkem vzduchu  $\alpha = 1,35$** 

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = O_{\text{H}_2\text{O min}} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{\text{vz min}}^{\text{s}} \quad (2-40)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,8241 + (1,0194 - 1) \cdot (1,35 - 1) \cdot 3,5186$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,8480 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Objemové části tříatomových plynů**

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2} + O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{sp}}} = \frac{8,1934 \cdot 10^{-4} + 0,7198}{5,5818} = 0,1291 \quad (2-41)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{\text{sp}}} = \frac{0,8480}{5,5818} = 0,1519 \quad (2-42)$$

**Součet objemových částí tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (2-43)$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu = \frac{10 \cdot A^{\text{f}}}{O_{\text{sp}}} \cdot \frac{x_{\text{p}}}{100} = \frac{10 \cdot 2,0}{5,5818} \cdot \frac{65}{100} = 2,3290 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2-44)$$

## 2.2.2 Entalpie vzduchu a produktů spalování

**Následující výpočty jsou uvedeny pro hodnoty  $\alpha = 1,35$  a  $t = 100$  °C**

### Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{sp \min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O \min} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (2-45)$$

$$I_{sp \min} = 0,7198 \cdot 170 + 8,1934 \cdot 10^{-4} \cdot 191,2 + 2,7493 \cdot 130 + 0,8241 \cdot 150,5 + 0,0324 \cdot 93,07$$

$$I_{sp \min} = 606,9742 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$I_{sp} = I_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz \min} \quad (2-46)$$

$$I_{sp} = 606,9742 + (1,35 - 1) \cdot 467,6571$$

$$I_{sp} = 770,6542 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tabulka 6: Entalpie základních složek spalin a měrné teplo v závislosti na teplotě

t [°C]	Entalpie složek spalin [kJ·Nm <sup>-3</sup> ]							Měrné teplo		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	SO <sub>2</sub>	CO	suchý vzduch	H <sub>2</sub> O	c <sub>s</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	c <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
100	131,7	130	170	93,07	191,2	130,2	132,3	150,5	1,300	1,505
200	267	260,7	357,5	186	394,1	261,4	266,2	304,5	1,307	1,522
300	406,8	393,3	558,9	278,8	610,4	395	402,5	462,6	1,317	1,542
400	550,9	528,4	772	371,7	836,5	531,7	541,7	626,3	1,329	1,565
500	698,7	666,1	994,4	464,7	1070	671,6	684,1	795,1	1,343	1,590
600	849,9	807,2	1225	557,3	1310	814,3	829,6	968,8	1,356	1,615
700	1003	951,2	1462	650,2	1554	960,4	978,1	1149	1,371	1,641
800	1159	1097	1705	743,1	1801	1109	1129	1334	1,384	1,668
900	1318	1246	1952	835,7	2052	1260	1283	1526	1,398	1,696
1000	1477	1397	2203	928,2	2304	1413	1439	1723	1,410	1,723
1100	1638	1544	2458	1020	2540	1567	1597	1925	1,421	1,750
1600	2465	2338	3812	1486	3838	2365	2403	2981	1,471	1,876
2000	3138	2978	4844	1857	4890	3008	3065	3925	1,500	1,963

### Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{vz \min} = O_{vz \min}^s \cdot (c \cdot t)_{vz} = 3,5186 \cdot 1,3291 \cdot 100 = 467,6571 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-47)$$

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,0194 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 12,0631 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2-48)$$

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} = 1,3 + 0,0016 \cdot 12,0631 \cdot 1,505 = 1,3291 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2-49)$$



**Entalpie popílku ve spalinách**

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot x_p} \quad (2-50)$$

$$2,0 > \frac{6 \cdot 16000}{41,8 \cdot 65}$$

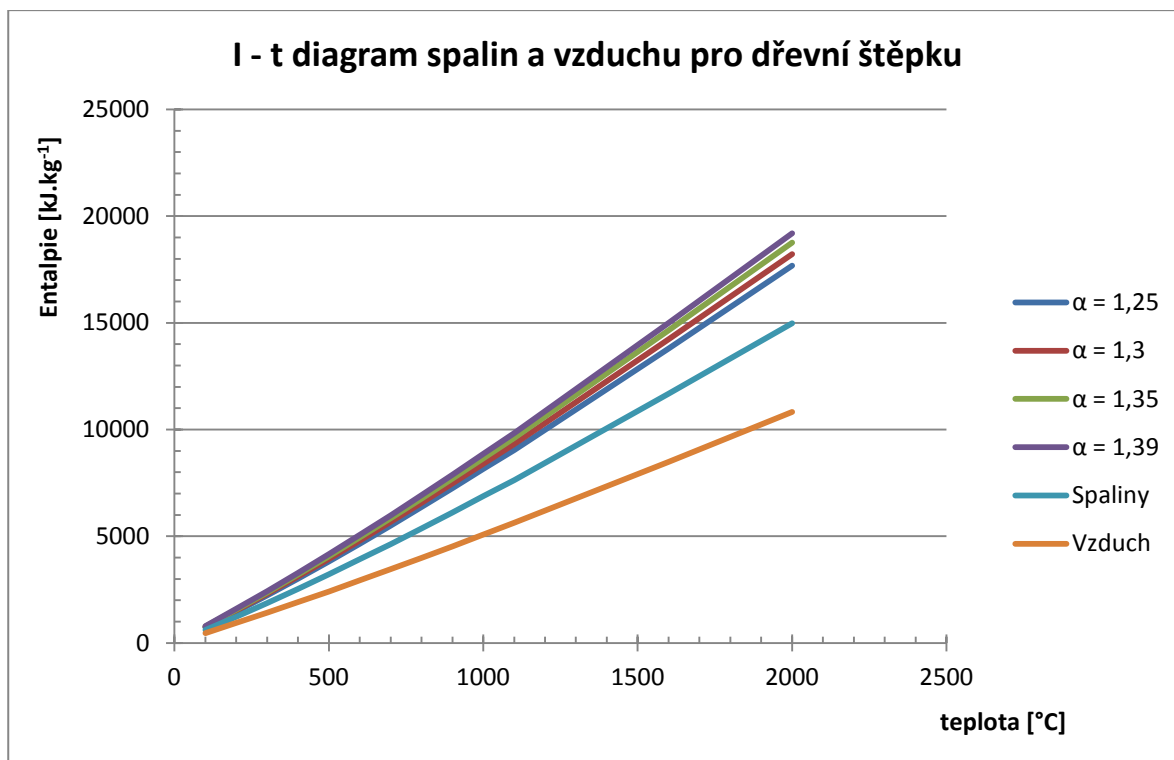
$2,0 > 35,33 \Rightarrow$  jelikož daná nerovnost není splněna, entalpie popílku  $I_p$  není ve spalinách uvažována

**Entalpie spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu**

Pro výpočet entalpií při daných teplotách spalin byly použity hodnoty entalpií a hodnoty měrného tepla uvedené v tab. 6.

Tabulka 7: Entalpie spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu

t [°C]	$I_{sp \min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_{vz \min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_{sp} = I_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz \min}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]			
			$\alpha = 1,25$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,35$	$\alpha = 1,39$
100	606,9742	467,6388	723,8839	747,2658	770,6478	789,3533
200	1231,3588	940,4346	1466,4674	1513,4891	1560,5109	1598,1282
300	1874,3578	1421,6151	2229,7616	2300,8424	2371,9231	2428,7877
400	2537,2780	1913,0009	3015,5282	3111,1783	3206,8283	3283,3484
500	3218,2527	2416,7302	3822,4353	3943,2718	4064,1083	4160,7775
600	3918,5079	2928,5400	4650,6429	4797,0699	4943,4969	5060,6385
700	4636,7124	3454,8113	5500,4152	5673,1558	5845,8964	5984,0888
800	5368,1426	3986,4162	6364,7466	6564,0674	6763,3882	6922,8449
900	6117,0120	4530,7639	7249,7030	7476,2411	7702,7793	7884,0099
1000	6878,3772	5078,2390	8147,9370	8401,8489	8655,7609	8858,8904
1100	7635,7092	5630,6549	9043,3730	9324,9057	9606,4385	9831,6647
1600	11679,6741	8485,2553	13800,9879	14225,2507	14649,5135	14988,9237
2000	14972,8925	10822,4239	17678,4985	18219,6196	18760,7408	19193,6378



Graf 2: Závislost entalpií spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu

### 3 Tepelná bilance kotle

#### 3.1 Hnědé uhlí

##### 3.1.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{vzv} = 23000 + 0 + 746,6583 = 23746,6583 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3-1)$$

kde:

$Q_i^r$	- výhřevnost paliva	[kJ] · kg <sup>-1</sup>
$i_p$	- fyzické teplo paliva	[kJ] · kg <sup>-1</sup>
$Q_{vzv}$	- teplo ohřátí vnějším zdrojem mimo kotel	[kJ] · kg <sup>-1</sup>

Fyzické teplo paliva se počítá tehdy, jestliže se palivo předeřívá mimo kotel. V případě, že palivo není předeříváno cizím zdrojem, fyzické teplo se uvažuje jen u paliv s obsahem vody splňující následující podmínku

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

$$10,0 \geq \frac{23000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

10,0 ≥ 36,5951 => jelikož podmínka není splněna, fyzické teplo není uvažováno

##### Teplo přivedené v parním ohříváku vzduchu

$$Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vz \min} = \beta \cdot (I_{vz \min}^{100} - I_{vz \min}^{25}) \quad (3-3)$$

$$Q_{vzv} = 1,25 \cdot (795,9668 - 198,6402) = 746,6583 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$\Delta I_{vz \min}$  - přírůstek entalpie minimálního množství vzduchu od teploty studeného vzduchu do teploty vzduchu na vstupu do ohříváku vzduchu

##### 3.1.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

###### Druhy tepelných ztrát u kotle

- ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)
- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- ztráta sdílením tepla do okolí
- ztráta fyzickým teplem spalín (komínová ztráta)
- ztráta nepočitatelná

**3.1.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem)**

Ztráta hořlavinou ve spalinách je způsobena chemickou nedokonalostí spalování. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_{co} = 0,1538 \%$$

**3.1.2.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích**

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích je způsobena obsahem uhlíku v tuhých zbytcích.

$$z_c = z_{cs} + z_{cr} + z_{cú} = 1,3251 + 0,3432 + 1,4415 = 3,1098 \%$$
 (3-4)

$z_c$	– ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
$z_{cs}$	– ztráta ve škváře nebo ve strusce, tj. v tuhých zbytcích zachycených v ohništi	[%]
$z_{cr}$	– ztráta roštovým propadem	[%]
$z_{cú}$	– ztráta v úletu, tj. v tuhých zbytcích odcházejících z kotelního zařízení	[%]

**Ztráta ve škváře nebo ve strusce**

$$z_{cs} = \frac{C_s}{100 - C_s} \cdot \frac{x_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cs} = \frac{8}{100 - 8} \cdot \frac{74}{100} \cdot \frac{15}{23746,6583} \cdot 32600 = 1,3251 \%$$
 (3-5)

**Ztráta roštovým propadem**

$$z_{cr} = \frac{C_r}{100 - C_r} \cdot \frac{x_r}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cr} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{5}{100} \cdot \frac{15}{23746,6583} \cdot 32600 = 0,3432 \%$$
 (3-6)

**Ztráta v úletu**

$$z_{cú} = \frac{C_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{x_{ú}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cú} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{21}{100} \cdot \frac{15}{23746,6583} \cdot 32600 = 1,4415 \%$$
 (3-7)

kde:

$C_i$	– procento hořlavinou v uvažovaném druhu tuhých zbytků	[%]
$x_i$	– procento popela, zachycované v uvažovaném druhu tuhých zbytků	[%]
$A^r$	– procento popela v palivu	[%]
$Q_p^p$	– teplo přivedené do kotle jedním kilogramem paliva	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_{ci}$	– výhřevnost hořlavinou uvažovaného druhu tuhých zbytků	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]

**3.1.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků**

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků spočívá v nevyužitém teple odcházejících tuhých zbytků.

$$z_f = z_{fs} + z_{fr} + z_{fú} = 0,1110 + 0,0109 + 0,0224 = 0,1443 \%$$
 (3-8)

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře nebo ve strusce**

$$z_{fs} = \frac{x_s}{100 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_s \cdot t_s = \frac{74}{100 - 8} \cdot \frac{15,0}{23746,6583} \cdot 0,84 \cdot 260 = 0,1110 \% \quad (3-9)$$

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků roštovým propadem**

$$z_{fr} = \frac{x_r}{100 - C_r} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_r \cdot t_r = \frac{5}{100 - 25} \cdot \frac{15,0}{23746,6583} \cdot 0,86 \cdot 300 = 0,0109 \% \quad (3-10)$$

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu**

$$z_{fú} = \frac{x_ú}{100 - C_ú} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_ú \cdot t_ú = \frac{21}{100 - 25} \cdot \frac{15,0}{23746,6583} \cdot 0,79 \cdot 160 = 0,0224 \% \quad (3-11)$$

**Měrné teplo tuhých zbytků popela**

$$c_s = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_s = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 260 = 0,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-12)$$

$$c_r = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_r = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 0,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-13)$$

$$c_ú = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_ú = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0,79 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-14)$$

kde:

 $t_i$  – teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků [3] [°C]**3.1.2.4 Ztráta sdílením tepla do okolí**

Ztráta sdílením tepla do okolí představuje teplo ztracené sáláním a vedením pláštěm kotle. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_{so} = 0,5918 \%$$

**3.1.2.5 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)**

Ztráta fyzickým teplem spalin je dána energií odcházejících plyných spalin. Je nejvýznamnější ztrátou kotle.

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (v_k - t_{vz})}{Q_p^p} \quad (3-15)$$

$$z_k = (100 - 3,1098) \cdot \frac{8,8153 \cdot 1,3762 \cdot (160 - 25)}{23746,6583} = 6,6824 \%$$

**Množství spalin za kotlem**

$$O_{sp} = O_{sp \min} + (\alpha_k - 1) \cdot O_{vz \min} = 6,4343 + (1,39 - 1) \cdot 6,1052 = 8,8153 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3-16)$$

**Entalpie spalín při teplotě a přebytku vzduchu za kotlem**

- přebytek vzduchu za kotlem  $\alpha_k = 1,39$  a teplota spalín za kotlem  $v_k = 160^\circ\text{C}$
- následující hodnoty vycházejí z tab. 4

$$I_{\text{SP}}^{160} = \frac{I_{\text{SP}}^{200} - I_{\text{SP}}^{100}}{100} \cdot (v_k - 100) + I_{\text{SP}}^{100} \quad (3-17)$$

$$I_{\text{SP}}^{160} = \frac{2433,4319 - 1202,3281}{100} \cdot (160 - 100) + 1202,3281$$

$$I_{\text{SP}}^{160} = 1940,9904 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Měrné teplo spalín**

$$c_{\text{sp}} = \frac{I_{\text{SP}}^{160}}{O_{\text{sp}} \cdot v_k} = \frac{1940,9904}{8,8153 \cdot 160} = 1,3762 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-18)$$

kde:

$v_k$	– teplota spalín za kotlem	$[\text{°C}]$
$t_{\text{vz}}$	– teplota nasávaného vzduchu	$[\text{°C}]$
$\alpha_k$	– přebytek vzduchu za kotlem	$[-]$

**3.1.2.6 Ztráta nepočitatelná**

Nepočitatelná ztráta se zavádí z důvodu eliminace dalších možných ztrát, které mohou vzniknout během procesu spalování. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_n = 0,4 \%$$

**3.1.2.7 Tepelná účinnost kotle**

$$\eta_k = 100 - \sum z = 100 - 11,0821 = 88,9179 \% \quad (3-19)$$

$$\sum z = z_{\text{co}} + z_c + z_f + z_{\text{so}} + z_k + z_n \quad (3-20)$$

$$\sum z = 0,1538 + 3,1098 + 0,1443 + 0,5918 + 6,6824 + 0,4 = 11,0821 \%$$

**3.1.3 Výrobní teplo páry a množství paliva****3.1.3.1 Výrobní teplo páry**

$$Q_v = M_{\text{pp}} \cdot (i_{\text{pp}} - i_{\text{nv}}) + M_o \cdot (i' - i_{\text{nv}}) \quad (3-21)$$

$$Q_v = 55,5556 \cdot (3433,0 - 553,4) + 0,01 \cdot 55,5556 \cdot (1420,8 - 553,4)$$

$$Q_v = 160,4598 \text{ MW}$$

kde:

$M_{pp}$	– parní výkon kotle	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$M_o$	– množství odľuhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$i_{pp}$	– entalpie přehřáté páry při tlaku 9,3 MPa a teplotě 520°C	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i$	– entalpie vroucí páry při tlaku v bubnu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{nv}$	– entalpie napájecí vody při teplotě 130°C	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

### 3.1.3.2 Množství paliva přivedeného do kotle

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{160459,8}{23746,6583 \cdot \frac{88,9179}{100}} = 7,6000 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3-22)$$

### 3.1.3.3 Množství skutečně spáleného paliva

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 7,6000 \cdot \left(1 - \frac{3,1098}{100}\right) = 7,3636 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3-23)$$

## 3.2 Dřevní štěpka

### 3.2.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{vzv} = 16000 + 0 + 438,6695 = 16438,6695 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3-24)$$

kde:

$Q_i^r$	- výhřevnost paliva	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_p$	- fyzické teplo paliva	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_{vzv}$	- teplo ohřátí vnějším zdrojem mimo kotel	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

Fyzické teplo paliva se počítá tehdy, jestliže se palivo přehřívá mimo kotel. V případě, že palivo není přehříváno cizím zdrojem, fyzické teplo se uvažuje jen u paliv s obsahem vody splňující následující podmínku.

$$W_t^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (3-25)$$

$$10,3 \geq \frac{16000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$10,0 \geq 25,4574 \Rightarrow$  jelikož podmínka není splněna, fyzické teplo není uvažováno

### Teplo přivedené v parním ohříváku vzduchu

$$Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vz \min} = \beta \cdot (I_{vz \min}^{100} - I_{vz \min}^{25}) \quad (3-26)$$

$$Q_{vzv} = 1,25 \cdot (467,6388 - 116,7032) = 438,6695 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$\Delta I_{vz \min}$  - přírůstek entalpie minimálního množství vzduchu od teploty studeného vzduchu do teploty vzduchu na vstupu do ohříváku vzduchu

### 3.2.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

#### 3.2.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem)

Ztráta hořlavinou ve spalinách je způsobena chemickou nedokonalostí spalování. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_{\text{co}} = 0,1546 \%$$

#### 3.2.2.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích je způsobena obsahem uhlíku v tuhých zbytcích.

$$z_c = z_{\text{cs}} + z_{\text{cr}} + z_{\text{cú}} = 0,1035 + 0,0661 + 0,8594 = 1,029 \% \quad (3-27)$$

$z_c$	– ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
$z_{\text{cs}}$	– ztráta ve škváře nebo ve strusce, tj. v tuhých zbytcích zachycených v ohništi	[%]
$z_{\text{cr}}$	– ztráta roštovým propadem	[%]
$z_{\text{cú}}$	– ztráta v úletu, tj. v tuhých zbytcích odcházejících z kotelního zařízení	[%]

#### Ztráta ve škváře nebo ve strusce

$$z_{\text{cs}} = \frac{C_s}{100 - C_s} \cdot \frac{x_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{\text{cs}} = \frac{8}{100 - 8} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 32600 = 0,1035 \% \quad (3-28)$$

#### Ztráta na roštu

$$z_{\text{cr}} = \frac{C_r}{100 - C_r} \cdot \frac{x_r}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{\text{cr}} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{5}{100} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 32600 = 0,0661 \% \quad (3-29)$$

#### Ztráta v úletu

$$z_{\text{cú}} = \frac{C_{\text{ú}}}{100 - C_{\text{ú}}} \cdot \frac{x_{\text{ú}}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{\text{cú}} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 32600 = 0,8594 \% \quad (3-30)$$

kde:

$C_i$	– procento hořlavinou v uvažovaném druhu tuhých zbytků	[%]
$X_i$	– procento popela, zachycované v uvažovaném druhu tuhých zbytků	[%]
$A^r$	– procento popela v palivu	[%]
$Q_p^p$	– teplo přivedené do kotle jedním kilogramem paliva	[kJ] · kg <sup>-1</sup>
$Q_{\text{ci}}$	– výhřevnost hořlavinou uvažovaného druhu tuhých zbytků	[kJ] · kg <sup>-1</sup>

#### 3.2.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků spočívá v nevyužitém teple odcházejících tuhých zbytků.

$$z_f = z_{\text{fs}} + z_{\text{fr}} + z_{\text{fú}} = 8,6646 \cdot 10^{-3} + 2,0926 \cdot 10^{-3} + 0,0133 = 0,0241 \% \quad (3-31)$$



**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře nebo ve strusce**

$$z_{fs} = \frac{x_s}{100 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_s \cdot t_s = \frac{30}{100 - 8} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 0,84 \cdot 260 = 8,6646 \cdot 10^{-3} \% \quad (3-32)$$

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků na roštu**

$$z_{fr} = \frac{x_r}{100 - C_r} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_r \cdot t_r = \frac{5}{100 - 25} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 0,86 \cdot 300 = 2,0926 \cdot 10^{-3} \% \quad (3-33)$$

**Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu**

$$z_{fú} = \frac{x_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{ú} \cdot t_{ú} = \frac{65}{100 - 25} \cdot \frac{2,0}{16438,6695} \cdot 0,79 \cdot 160 = 0,0133 \% \quad (3-34)$$

**Měrné teplo tuhých zbytků popela**

$$c_s = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_s = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 260 = 0,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-35)$$

$$c_r = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_r = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 0,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-36)$$

$$c_{ú} = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ú} = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0,79 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-37)$$

kde:

$t_i$  – teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků [3] [°C]

**3.2.2.4 Ztráta sdílením tepla do okolí**

Ztráta sdílením tepla do okolí představuje teplo ztracené sáláním a vedením pláštěm kotle. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_{so} = 0,5918 \%$$

**3.2.2.5 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)**

Ztráta fyzickým teplem spalin je dána energií odcházejících plyných spalin. Je nejvýznamnější ztrátou kotle.

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (v_k - t_{vz})}{Q_p^p} \quad (3-38)$$

$$z_k = (100 - 1,029) \cdot \frac{5,7253 \cdot 1,3914 \cdot (160 - 25)}{16438,6695} = 6,4748 \%$$

**Množství spalin za kotlem**

$$O_{sp} = O_{sp \min} + (\alpha_k - 1) \cdot O_{vz \min} = 4,3264 + (1,39 - 1) \cdot 3,5869 = 5,7253 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3-39)$$

**Entalpie spalin při teplotě a přebytku vzduchu za kotlem**

- přebytek vzduchu za kotlem  $\alpha_k = 1,39$  a teplota spalin za kotlem  $v_k = 160^\circ\text{C}$
- následující hodnoty vycházejí z tab. 7

$$I_{\text{SP}}^{160} = \frac{I_{\text{SP}}^{200} - I_{\text{SP}}^{100}}{100} \cdot (v_k - 100) + I_{\text{SP}}^{100} \quad (3-40)$$

$$I_{\text{SP}}^{160} = \frac{1598,1282 - 789,3533}{100} \cdot (160 - 100) + 789,3533$$

$$I_{\text{SP}}^{160} = 1274,6182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Měrné teplo spalin**

$$c_{\text{sp}} = \frac{I_{\text{sp}}}{O_{\text{sp}} \cdot v_k} = \frac{1274,6182}{5,7253 \cdot 160} = 1,3914 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3-41)$$

kde:

$v_k$	- teplota spalin za kotlem	[°C]
$t_{\text{vz}}$	- teplota nasávaného vzduchu	[°C]
$\alpha_k$	- přebytek vzduchu za kotlem	[-]

**3.2.2.6 Ztráta nepočitatelná**

Nepočitatelná ztráta se zavádí z důvodu eliminace dalších možných ztrát, které mohou vzniknout během procesu spalování. Hodnota vychází z firemních podkladů. [3]

$$z_n = 0,4 \%$$

**3.2.2.7 Tepelná účinnost kotle**

$$\eta_k = 100 - \sum z = 100 - 8,6743 = 91,3257 \% \quad (3-42)$$

$$\sum z = z_{\text{co}} + z_c + z_f + z_{\text{so}} + z_k + z_n = 100 - 8,6743 = 91,3257 \% \quad (3-43)$$

$$\sum z = 0,1546 + 1,029 + 0,0241 + 0,5918 + 6,4748 + 0,4 = 8,6743 \%$$

**3.2.3 Množství paliva****3.2.3.1 Množství paliva přivedeného do kotle**

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{160459,8}{16438,6695 \cdot \frac{91,3257}{100}} = 10,6882 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3-44)$$

**3.2.3.2 Množství skutečně spáleného paliva**

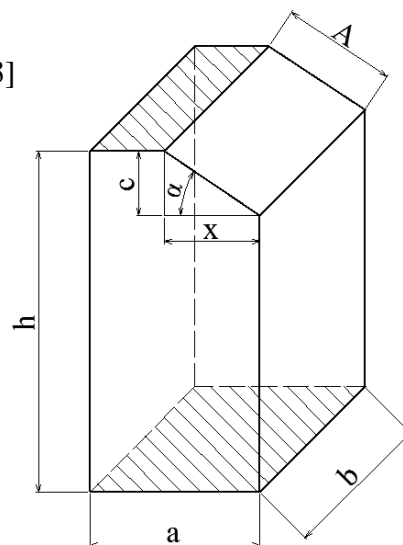
$$M_{\text{pv}} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 10,6882 \cdot \left(1 - \frac{1,029}{100}\right) = 10,5782 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3-45)$$

## 4 Výpočet spalovací komory

Rozměry spalovací komory vycházejí z firemních podkladů.[3]

Tabulka 8: Rozměry spalovací komory

Přední strana	a	7415	mm	7,415	m
Boční strana	b	13020	mm	13,020	m
Výška	h	18800	mm	18,800	m
Zkosení	$\alpha$	25	°	-	-
Výška přepony	c	1810	mm	1,810	m
Šířka přepony	x	3885	mm	3,885	m
Délka přepony	A	4285,9	mm	4,2859	m



Obrázek 1: Schéma spalovací komory

### Objem ohniště

$$V_o = a \cdot b \cdot h - \frac{c \cdot x}{2} \cdot b = 7,415 \cdot 13,020 \cdot 18,800 - \frac{1,810 \cdot 3,885}{2} \cdot 13,020 = 1769,2367 \text{ m}^3 \quad (4-1)$$

### Skutečná plocha roštu

$$R = a \cdot b = 7,415 \cdot 13,020 = 96,5433 \text{ m}^2 \quad (4-2)$$

### Plocha výstupního okna

$$S_{vo} = (a - x) \cdot b = (7,415 - 3,885) \cdot 13,020 = 45,9606 \text{ m}^2 \quad (4-3)$$

### Celková plocha ohniště

$$S_{tr} = 2 \cdot (a - x) \cdot h + b \cdot h + 2 \cdot x \cdot (h - c) + b \cdot (h - c) + 2 \cdot \frac{x \cdot c}{2} + b \cdot A \quad (4-4)$$

$$S_{tr} = 2 \cdot (7,415 - 3,885) \cdot 18,800 + 13,020 \cdot 18,800 + 2 \cdot 3,885 \cdot (18,800 - 1,810) + 13,020 \cdot (18,800 - 1,810) + 2 \cdot \frac{3,885 \cdot 1,810}{2} + 13,020 \cdot 4,2859$$

$$S_{tr} = 793,5604 \text{ m}^2$$

### Povrch stěn ohniště

$$S_{st} = S_{vo} + S_{tr} + R = 45,9606 + 793,5604 + 96,5433 = 936,0643 \text{ m}^2 \quad (4-5)$$

### Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$S_{ús} = S_{tr} \cdot x_{st} = 793,5604 \cdot 1 = 793,5604 \text{ m}^2 \quad (4-6)$$

kde:

$x_{st}$  - úhlový součinitel trubkové stěny - membránová stěna = 1 [1]

## 4.1 Hnědé uhlí

### Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{7,6000 \cdot 23000}{1769,2367} = 98,8010 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4-7)$$

### Skutečné zatížení roštu

$$q_s = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{R} = \frac{7,6000 \cdot 23000}{96,5433} = 1,8106 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4-8)$$

#### 4.1.1 Tepelný výpočet ohniště

Tepelný výpočet ohniště je vychází z principů teorie podobnosti tepelných procesů probíhající ve spalovací komoře.

##### 4.1.1.1 Teplota spalin na konci ohniště

Výpočet teploty spalin na konci ohniště je založen na iteračním postupu. Pro následující výpočty je zvolena předběžná teplota odchozích spalin  $v_o = 948 \text{ °C}$

$$v_o = \frac{v_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1813,5 + 273,15}{1 + 0,52 \cdot \left(\frac{0,7592}{0,4533}\right)^{0,6}} - 273,15 = 948 \text{ °C} \quad (4-9)$$

##### 4.1.1.2 Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{co} - z_c - z_{fs}}{100 - z_c} + Q_{vz} - Q_{vzv} \quad (4-10)$$

$$I_u = 23746,6583 \cdot \frac{100 - 0,1538 - 3,1098 - 0,1110}{100 - 3,1098} + 2430,2611 - 746,6583$$

$$I_u = 25365,3617 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- této entalpii odpovídá adiabatická teplota plamene  $v_a = 1813,5 \text{ °C}$

kde:

$Q_p^p$	- teplo přivedené do kotle	[kJ] · kg <sup>-1</sup>
$Q_{vz}$	- teplo přivedené do kotle se vzduchem	[kJ] · kg <sup>-1</sup>
$z_{co}$	- ztráta chemickým nedopalem	[%]
$z_c$	- ztráta mechanickým nedopalem	[%]
$z_f$	- ztráta fyzickým teplem strusky	[%]

### Teplo přivedené do kotle se vzduchem

$$Q_{vz} = (\alpha_o - \Delta\alpha_o) \cdot I'_{vz \min}^{240} + \Delta\alpha_o \cdot I''_{vz \min}^{25} \quad (4-11)$$

$$Q_{vz} = (1,35 - 0,1) \cdot 1928,3177 + 0,1 \cdot 198,6402$$

$$Q_{vz} = 2430,2611 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$\alpha_0$	- přebytek vzduchu na konci ohniště	[-]
$\Delta\alpha_0$	- zvětšení přísávání v ohništi	[-]
$I'_{vz\ min}$	- entalpie minimálního množství horkého vzduchu	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I''_{vz\ min}$	- entalpie nasávaného studeného vzduchu	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]

**4.1.1.3 Součinitel M**

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_0 = 0,59 - 0,5 \cdot 0,14 = 0,52 \quad (4-12)$$

**4.1.1.4 Boltzmannovo číslo**

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot c}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot S_{st} \cdot T_a^3} = \frac{0,9934 \cdot 7,3636 \cdot 15,0372}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,5 \cdot 936,0643 \cdot 2086,65^3} = 0,4533 \quad (4-13)$$

kde:

$M_{pv}$	- množství paliva skutečně spáleného	[kg · s <sup>-1</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště včetně výstupního otvoru	[m <sup>2</sup> ]
$\overline{\psi}$	- střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěny	[-]
$\overline{O_{sp} \cdot c}$	- střední celkové měrné teplo spalín	[kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$T_a$	- teoretická teplota plamene	[K]
$\varphi$	- součinitel uchování tepla	[-]
$5,7 \cdot 10^{-11}$	- Boltzmannova konstanta absolutně černého tělesa	[kW · m <sup>-2</sup> · K <sup>-4</sup> ]

**Součinitel uchování tepla**

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,5918}{88,9179 + 0,5918} = 0,9934 \quad (4-14)$$

kde:

$z_{so}$	- ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením	[-]
$\eta_k$	- tepelná účinnost kotle	[%]

**Střední celkové měrné teplo**

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_o}{v_a - v_o} = \frac{25365,3617 - 12350,5921}{1813,5 - 948} = 15,0372 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \quad (4-15)$$

kde:

$I_u$	- teplo uvolněné ve spalovací komoře	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_o$	- entalpie spalín na výstupu z ohniště pro $v_o$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$v_o$	- teplota spalín na výstupu z ohniště	[°C]
$v_a$	- adiabatická teplota plamene	[°C]

**Součinitel tepelné efektivity stěn**

$$\psi = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \quad (4-16)$$

kde:

$x$	- úhlový součinitel trubkové stěny [1]	[-]
$\xi$	- součinitel zanesení stěn ohniště [1]	[-]

**4.1.1.5 Stupeň černosti ohniště**

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R}{S_{st}}\right)} = \frac{0,5630 + (1 - 0,5630) \cdot \frac{96,5433}{936,0643}}{1 - (1 - 0,5630) \cdot (1 - 0,5) \cdot \left(1 - \frac{96,5433}{936,0643}\right)} = 0,7592 \quad (4-17)$$

kde:

$a_{pl}$	- efektivní stupeň černosti plamene	[-]
$R$	- plocha hořící vrstvy na roštu	[m <sup>2</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště	[m <sup>2</sup> ]
$\bar{\psi}$	- střední hodnota součinitele tepelné efektivnosti stěn	[-]

**Stupeň černosti prostředí v ohništi**

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,2166 \cdot 0,1 \cdot 6,8043} = 0,5630 \quad (4-18)$$

kde:

$k$	- součinitel zeslabení sáláním	[-]
$p$	- tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaku v ohništi $p = 0,1$	[MPa]
$s$	- účinná tloušťka sálavé vrstvy	[m]

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{1769,2367}{936,0643} = 6,8043 \text{ m} \quad (4-19)$$

kde:

$V_0$	- aktivní objem ohniště	[m <sup>3</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště	[m <sup>2</sup> ]

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (4-20)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 6,8043}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1221,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 0,7289 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde:

$r_{sp}$	- objemová část tříatomových plynů, $r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$	[-]
$r_{H_2O}$	- objemová část vody	[-]
$r_{RO_2}$	- objemová část	[-]
$p_{sp}$	- celkový parciální tlak	[MPa]
$s$	- účinná tloušťka sálavé vrstvy	[m]
$T_0$	- teplota na konci ohniště	[K]

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (4-21)$$

**Součinitel zeslabení sálání**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (4-22)$$

$$k = 0,7289 + 0,1877 + 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,03 = 1,2166 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde:

$$k_k \quad - \text{ součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [1] \quad [-]$$

$$\kappa_1 \quad - \text{ hodnota závislá na druhu paliva [1] \quad [-]$$

$$\kappa_2 \quad - \text{ hodnota závislá na způsobu spalování [1] \quad [-]$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1221,15^2 \cdot 20^2}} \cdot 3,6751 = 0,1877 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (4-23)$$

kde:

$$\mu \quad - \text{ koncentrace popílku ve spalinách \quad [g \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$d \quad - \text{ střední efektivní průměr částiček popílku [1] \quad [\mu\text{m}]$$

**4.1.1.6 Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn**

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,9934 \cdot (25365,3617 - 12350,5921) = 12928,8721 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4-24)$$

kde:

$$I_u \quad - \text{ teplo uvolněné ve spalovací komoře \quad [kJ \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$I_o \quad - \text{ entalpie spalin na výstupu z ohniště pro teplotu \quad [kJ \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\varphi \quad - \text{ součinitel uchování tepla \quad [-]$$

**Účinná sálavá plocha stěn**

$$S_{\text{ús}}^{\text{tr}} = S_{\text{tr}} \cdot \psi = 793,5604 \cdot 0,5 = 396,7802 \text{ m}^2 \quad (4-25)$$

**Účinná sálavá plocha výstupního okna**

$$S_{\text{ús}}^{\text{vo}} = S_{\text{vo}} \cdot \psi = 45,9606 \cdot 0,5 = 22,9803 \text{ m}^2 \quad (4-26)$$

**Střední tepelný tok**

$$\bar{q} = \frac{Q_s \cdot M_{\text{pv}}}{S_{\text{ús}}^{\text{tr}} + S_{\text{ús}}^{\text{vo}}} = \frac{12928,8721 \cdot 7,3636}{396,7802 + 22,9803} = 226,8032 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4-27)$$

**Tepelný tok na trubky výparníku**

$$Q_{\text{st}} = \bar{q} \cdot S_{\text{ús}}^{\text{tr}} = 226,8032 \cdot 396,7802 = 89991,0362 \text{ kW} \quad (4-28)$$

**Tepelný tok na výstupní okno**

$$Q_{\text{ods}} = \bar{q} \cdot S_{\text{ús}}^{\text{vo}} = 226,8032 \cdot 22,9803 = 5212,0056 \text{ kW} \quad (4-29)$$

## 4.2 Dřevní štěpka

### Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{10,6882 \cdot 16000}{1769,2367} = 96,6582 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4-30)$$

### Skutečné zatížení roštu

$$q_s = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{R} = \frac{10,6882 \cdot 16000}{96,5433} = 1,7713 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4-31)$$

### 4.2.1 Tepelný výpočet ohniště

#### 4.2.1.1 Teplota spalin na konci ohniště

Výpočet teploty spalin na konci ohniště je založen na iteračním postupu. Pro následující výpočty je zvolena předběžná teplota odchozích spalin  $v_o = 969 \text{ °C}$

$$v_o = \frac{v_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1867,7 + 273,15}{1 + 0,52 \cdot \left(\frac{0,7792}{0,4488}\right)^{0,6}} - 273,15 = 969 \text{ °C} \quad (4-32)$$

#### 4.2.1.2 Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{co} - z_c - z_{fs}}{100 - z_c} + Q_{vz} - Q_{vzv} \quad (4-33)$$

$$I_u = 16438,6695 \cdot \frac{100 - 0,1546 - 1,029 - 8,6646 \cdot 10^{-3}}{100 - 1,029} + 1427,8038 - 438,6695$$

$$I_u = 17400,6862 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- této entalpii odpovídá adiabatická teplota plamene  $v_a = 1867,7 \text{ °C}$

kde:

$Q_p^p$	- teplo přivedené do kotle	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_{vz}$	- teplo přivedené do kotle se vzduchem	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$z_{co}$	- ztráta chemickým nedopalem	$[\%]$
$z_c$	- ztráta mechanickým nedopalem	$[\%]$
$z_f$	- ztráta fyzickým teplem strusky	$[\%]$

### Teplo přivedené do kotle se vzduchem

$$Q_{vz} = (\alpha_o - \Delta\alpha_o) \cdot I'_{vz \min}^{240} + \Delta\alpha_o \cdot I''_{vz \min}^{25} \quad (4-34)$$

$$Q_{vz} = (1,35 - 0,1) \cdot 1132,9068 + 0,1 \cdot 116,7032$$

$$Q_{vz} = 1427,8038 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$\alpha_o$	- přebytek vzduchu na konci ohniště	$[-]$
------------	-------------------------------------	-------



$\Delta\alpha_0$	- zvětšení přisávání v ohništi	[-]
$I_{vz\ min}$	- entalpie minimálního množství horkého vzduchu	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_{vo\ min}$	- entalpie nasávaného studeného vzduchu	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]

#### 4.2.1.3 Součinitel M

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_0 = 0,59 - 0,5 \cdot 0,14 = 0,52 \quad (4-35)$$

#### 4.2.1.4 Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot c}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot S_{st} \cdot T_a^3} = \frac{0,9936 \cdot 10,5782 \cdot 10,0594}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 936,0643 \cdot 2140,85^3} = 0,4488 \quad (4-36)$$

kde:

$M_{pv}$	- množství paliva skutečně spáleného	[kg · s <sup>-1</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště včetně výstupního otvoru	[m <sup>2</sup> ]
$\overline{\psi}$	- střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn	[-]
$\overline{O_{sp} \cdot c}$	- střední celkové měrné teplo spalin	[kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$T_a$	- teoretická teplota plamene	[K]
$\varphi$	- součinitel uchování tepla	[-]
$5,7 \cdot 10^{-11}$	- Boltzmannova konstanta absolutně černého tělesa	[kW · m <sup>-2</sup> · K <sup>-4</sup> ]

#### Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,5918}{91,3257 + 0,5918} = 0,9936 \quad (4-37)$$

kde:

$z_{so}$	- ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením	[-]
$\eta_k$	- tepelná účinnost kotle	[%]

#### Střední celkové měrné teplo

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_o}{v_a - v_o} = \frac{17400,6862 - 8360,3366}{1867,7 - 969} = 10,0594 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \quad (4-38)$$

kde:

$I_u$	- teplo uvolněné ve spalovací komoře	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_o$	- entalpie spalin na výstupu z ohniště pro $v_o$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$v_o$	- teplota spalin na výstupu z ohniště	[°C]
$v_a$	- adiabatická teplota plamene	[°C]

#### Součinitel tepelné efektivity stěn

$$\psi = x_{st} \cdot \xi = 1 \cdot 0,45 = 0,45 \quad (4-39)$$

kde:

$x$	- úhlový součinitel trubkové stěny [1]	[-]
$\xi$	- součinitel zanesení stěn ohniště [1]	[-]

**4.2.1.5 Stupeň černosti ohniště**

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R}{S_{st}}\right)} = \frac{0,5699 + (1 - 0,5699) \cdot \frac{96,5433}{936,0643}}{1 - (1 - 0,5699) \cdot (1 - 0,45) \cdot \left(1 - \frac{96,5433}{936,0643}\right)} = 0,7792 \quad (4-40)$$

kde:

$a_{pl}$	- efektivní stupeň černosti plamene	[-]
$R$	- plocha hořící vrstvy na roštu	[m <sup>2</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště	[m <sup>2</sup> ]
$\bar{\psi}$	- střední hodnota součinitele tepelné efektivnosti stěn	[-]

**Stupeň černosti prostředí v ohništi**

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,2400 \cdot 0,1 \cdot 6,8043} = 0,5699 \quad (4-41)$$

kde:

$k$	- součinitel zeslabení sáláním	[-]
$p$	- tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaku v ohništi $p = 0,1$	[MPa]
$s$	- účinná tloušťka sálavé vrstvy	[m]

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{1769,2367}{936,0643} = 6,8043 \text{ m} \quad (4-42)$$

kde:

$V_0$	- aktivní objem ohniště	[m <sup>3</sup> ]
$S_{st}$	- celkový povrch stěn ohniště	[m <sup>2</sup> ]

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_o}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (4-43)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 6,8043}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1242,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 0,9724 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde:

$r_{sp}$	- objemová část tříatomových plynů	[-]
$r_{H_2O}$	- objemová část vody	[-]
$r_{RO_2}$	- objemová část	[-]
$p_{sp}$	- celkový parciální tlak	[MPa]
$s$	- účinná tloušťka sálavé vrstvy	[m]
$T_o$	- teplota na konci ohniště	[K]

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (4-44)$$

**Součinitel zeslabení sálání**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (4-45)$$

$$k = 0,9724 + 0,1176 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 1,2400 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde:

$k_k$  - součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [1] [-]

$\kappa_1$  - hodnota závislá na druhu paliva [1] [-]

$\kappa_2$  - hodnota závislá na způsobu spalování [1] [-]

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1242,15^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,3290 = 0,1176 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (4-46)$$

kde:

$\mu$  - koncentrace popílku ve spalinách [g · kg<sup>-1</sup>]

$d$  - střední efektivní průměr částiček popílku [1] [μm]

**4.2.1.6 Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn**

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,9936 \cdot (17400,6862 - 8360,3366) = 8982,4914 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4-47)$$

kde:

$I_u$  - teplo uvolněné ve spalovací komoře [kJ · kg<sup>-1</sup>]

$I_o$  - entalpie spalin na výstupu z ohniště pro teplotu [kJ · kg<sup>-1</sup>]

$\varphi$  - součinitel uchování tepla [-]

**Účinná sálavá plocha stěn**

$$S_{\text{ús}}^{\text{tr}} = S_{\text{tr}} \cdot \psi = 793,5604 \cdot 0,45 = 357,1022 \text{ m}^2 \quad (4-48)$$

**Účinná sálavá plocha výstupního okna**

$$S_{\text{ús}}^{\text{vo}} = S_{\text{vo}} \cdot \psi = 45,9606 \cdot 0,45 = 20,6823 \text{ m}^2 \quad (4-49)$$

**Střední tepelný tok**

$$\bar{q} = \frac{Q_s \cdot M_{\text{pv}}}{S_{\text{ús}}^{\text{tr}} + S_{\text{ús}}^{\text{vo}}} = \frac{8982,4914 \cdot 10,5782}{357,1022 + 20,6823} = 251,5153 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4-50)$$

**Tepelný tok na trubky výparníku**

$$Q_{\text{st}} = \bar{q} \cdot S_{\text{ús}}^{\text{tr}} = 251,5153 \cdot 357,1022 = 89816,6752 \text{ kW} \quad (4-51)$$

**Tepelný tok na výstupní okno**

$$Q_{\text{ods}} = \bar{q} \cdot S_{\text{ús}}^{\text{vo}} = 251,5153 \cdot 20,6823 = 5201,9149 \text{ kW} \quad (4-52)$$

### 4.3 Návrh roštu

Pro spalování daného paliva je použit pásový rošt moderní konstrukce s pohazováním paliva pomocí vzduchového ventilátoru a pohazovacího zařízení.

### 4.4 Množství vzduchu na vstupu do spalovací komory

Množství primárního a sekundárního vzduchu přiváděného do spalovací komory se odvíjí od obsahu prchavé hořlaviny, kterou jednotlivá paliva obsahují. Prchavou hořlavinu lze definovat jako plyn, který se začne uvolňovat z paliva při jeho zahřátí na určitou teplotu. Čím je větší podíl prchavé hořlaviny, tím delším plamenem palivo hoří. Uhlí, jež obsahuje kolem 35 % prchavé hořlaviny, hoří především na roštu a proto je nutné pro zajištění ideálního vyhoření hořlaviny přivádět pod rošt větší množství vzduchu primárního. Naopak pro dřevní štěpku, která obsahuje kolem 75 % prchavé hořlaviny, a tudíž hoří i delším plamenem je nutné pro ideální vyhoření přivádět větší množství vzduchu sekundárního. Hubice tohoto vzduchu jsou umístěné po výšce spalovací komory a foukají vzduch bočními otvory po jejím obvodu.

Množství vzduchu pro spalování různého druhu paliva je tedy nastaveno následovně:

#### Množství vzduchu na vstupech do spalovací komory - uhlí

Primární vzduch	60 % celkového množství vzduchu
Sekundární vzduch	40 % celkového množství vzduchu

#### Množství vzduchu na vstupech do spalovací komory – dřevní štěpka

Primární vzduch	35 % celkového množství vzduchu
Sekundární vzduch	65 % celkového množství vzduchu

## 5 Výpočet konvekčních ploch

### 5.1 Zadané hodnoty přehřáté páry

Tabulka 9: Zadané hodnoty přehřáté páry

Parní výkon	$M_{pp}$	200	$t \cdot h^{-1}$	55,5556	$kg \cdot s^{-1}$
Tlak přehřáté páry	$p_{pp}$	9,3	MPa	93	bar
Teplota přehřáté páry	$t_{pp}$	520	°C	-	-
Teplota napájecí vody	$t_{nv}$	130	°C	-	-

### 5.2 Tlakové ztráty a entalpické spády v jednotlivých výhřevných plochách

Tabulka 10: Tlakové ztráty a entalpické spády

	Tlaková ztráta $\Delta p$				Entalpický spád $\Delta i$	
Přehřívák SH4	0,21	MPa	2,1	bar	152	$kJ \cdot kg^{-1}$
Přehřívák SH3	0,04	MPa	0,4	bar	312	$kJ \cdot kg^{-1}$
Přehřívák SH2	0,12	MPa	1,2	bar	180	$kJ \cdot kg^{-1}$
Přehřívák SH1b	0,2	MPa	2	bar	111	$kJ \cdot kg^{-1}$
Přehřívák SH1a	0,43	MPa	4,3	bar		
Výparník	0	MPa	0	bar		
Ekonomizér 3	0,03	MPa	0,3	bar		
Ekonomizér 2	0,16	MPa	1,6	bar		
Ekonomizér 1	0,16	MPa	1,6	bar		

### 5.3 Vstříky a odluh

Tabulka 11: Vstříky a odluh

Vstřík 1 – $M_{v1}$	3,95	$kg \cdot s^{-1}$
Vstřík 2 – $M_{v2}$	0,5	$kg \cdot s^{-1}$
Odluh – $M_o$	0,5556	$kg \cdot s^{-1}$

### 5.4 Rozložení tepelných výkonů

V následující kapitole je rozvržen celkový tepelný výkon do jednotlivých výhřevných ploch. Za pomoci daného programu byly určeny potřebné parametry (teplota, entalpie) daných médií (pára, voda). Hodnoty entalpií vzduchu vycházejí z tabulky 4 resp. z tabulky 7.

## 5.4.1 Ohřívák vzduchu – první stupeň AH1

### 5.4.1.1 Hnědé uhlí

Tabulka 12: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH1 pro hnědé uhlí

Hodnoty – první stupeň AH1			
Vstupní teplota	$t_{in}^{AH1}$	100	°C
Výstupní teplota	$t_{out}^{AH1}$	150	°C
Vstupní entalpie	$i_{in}^{AH1}$	795,967	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstupní entalpie	$i_{out}^{AH1}$	1198,339	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

### Tepelný výkon AH1

$$Q_{AH1} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{out}^{AH1} - i_{in}^{AH1}) \quad (5-1)$$

$$Q_{AH1} = 7,3636 \cdot 1,25 \cdot (1198,339 - 795,967) = 3703,6331 \text{ kW}$$

### 5.4.1.2 Dřevní štěpka

Tabulka 13: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH1 pro dřevní štěpku

Hodnoty – první stupeň AH1			
Vstupní teplota	$t_{in}^{AH1}$	100	°C
Výstupní teplota	$t_{out}^{AH1}$	150	°C
Vstupní entalpie	$i_{in}^{AH1}$	467,639	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstupní entalpie	$i_{out}^{AH1}$	704,037	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

### Tepelný výkon AH1

$$Q_{AH1} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{out}^{AH1} - i_{in}^{AH1}) \quad (5-2)$$

$$Q_{AH1} = 10,5782 \cdot 1,25 \cdot (704,037 - 467,639) = 3125,8317 \text{ kW}$$

## 5.4.2 Ekonomizér – EKO 1

Tabulka 14: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO1

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{EKO1}$	130	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{EKO1}$	146	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{EKO1}$	10,65	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{EKO1}$	10,49	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{EKO1}$	553,400	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{EKO1}$	621,394	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

### Tepelný výkon EKO 1

$$Q_{EKO1} = (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{EKO1} - i_{in}^{EKO1}) \quad (5-3)$$

$$Q_{EKO1} = (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (621,394 - 553,400) = 3512,6516 \text{ kW}$$

### 5.4.3 Ekonomizér – EKO 2

Tabulka 15: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{EKO2}$	146	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{EKO2}$	169	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{EKO2}$	10,49	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{EKO2}$	10,33	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{EKO2}$	621,394	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{EKO2}$	720,163	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Tepelný výkon EKO 2

$$Q_{EKO2} = (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{EKO2} - i_{in}^{EKO2}) \quad (5-4)$$

$$Q_{EKO2} = (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (720,163 - 621,394) = 5102,5251 \text{ kW}$$

### 5.4.4 Ohřívák vzduchu – druhý stupeň AH2

#### 5.4.4.1 Hnědé uhlí

Tabulka 16: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH2 pro hnědé uhlí

Hodnoty – druhý stupeň AH2			
Vstupní teplota	$t_{in}^{AH2}$	150	°C
Výstupní teplota	$t_{out}^{AH2}$	240	°C
Vstupní entalpie	$i_{in}^{AH2}$	1198,339	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstupní entalpie	$i_{out}^{AH2}$	1928,318	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Tepelný výkon AH2

$$Q_{AH2} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{out}^{AH2} - i_{in}^{AH2}) \quad (5-5)$$

$$Q_{AH2} = 7,3636 \cdot 1,25 \cdot (1928,318 - 1198,339) = 6719,0917 \text{ kW}$$

#### 5.4.4.2 Dřevní štěpka

Tabulka 17: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH2 pro dřevní štěpku

Hodnoty – druhý stupeň AH2			
Vstupní teplota	$t_{in}^{AH2}$	150	°C
Výstupní teplota	$t_{out}^{AH2}$	240	°C
Vstupní entalpie	$i_{in}^{AH2}$	704,037	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Výstupní entalpie	$i_{out}^{AH2}$	1132,907	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Tepelný výkon AH1

$$Q_{AH2} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{out}^{AH2} - i_{in}^{AH2}) \quad (5-6)$$

$$Q_{AH2} = 10,5782 \cdot 1,25 \cdot (1132,907 - 704,037) = 5670,8408 \text{ kW}$$

### 5.4.5 Ekonomizér – EKO 3

Tabulka 18: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO3

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{EKO3}$	169	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{EKO3}$	200	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{EKO3}$	10,33	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{EKO3}$	10,3	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{EKO3}$	720,163	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{EKO3}$	856,048	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Tepelný výkon EKO 3

$$Q_{EKO3} = (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{EKO3} - i_{in}^{EKO3}) \quad (5-7)$$

$$Q_{EKO3} = (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (856,048 - 720,163) = 7019,9822 \text{ kW}$$

#### 5.4.6 Výparník

- uvažován nedohřev vody vůči mezi sytosti 113,2 °C

#### Tlak ve výparníku

$$p^{výp} = p_{pp} + \Delta p_{SH4} + \Delta p_{SH3} + \Delta p_{SH2} + \Delta p_{SH1b} + \Delta p_{SH1a} \quad (5-8)$$

$$p^{výp} = 9,3 + 0,21 + 0,04 + 0,12 + 0,2 + 0,43$$

$$p^{výp} = 10,3 \text{ MPa}$$

Tabulka 19: Hodnoty přehřáté páry a syté kapaliny výparníku

Hodnoty - výparník			
Tlak	$p^{výp}$	10,3	MPa
Teplota sytosti	$t_{syt}$	313,2	°C
Entalpie – sytá pára	$i''$	2719,900	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpie – sytá kapalina	$i'$	1420,800	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Tepelný výkon výparníku

$$Q_{VYP} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i'' - i_{out}^{EKO3}) + M_o \cdot (i' - i_{out}^{EKO3}) \quad (5-9)$$

$$Q_{VYP} = (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (2719,900 - 856,048) + 0,5556 \cdot (1420,8000 - 856,048)$$

$$Q_{VYP} = 95567,0501 \text{ kW}$$



### 5.4.7 Přehřívák SH1a

Tabulka 20: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH1a

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH1a}$	313,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH1a}$	371,2	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH1a}$	10,3	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH1a}$	9,87	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH1a}$	2719,900	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH1a}$	3006,815	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Teplný výkon přehříváku SH1a

$$Q_{SH1a} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{SH1a} - i_{in}^{SH1a}) \quad (5-10)$$

$$Q_{SH1a} = (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (3006,815 - 2719,900) = 14662,9632 \text{ kW}$$

### 5.4.8 Přehřívák SH1b

Tabulka 21: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH1b

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH1b}$	371,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH1b}$	404,4	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH1b}$	9,87	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH1b}$	9,67	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH1b}$	3006,815	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH1b}$	3117,815	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Teplný výkon přehříváku SH1b

$$Q_{SH1b} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{SH1b} - i_{in}^{SH1b}) \quad (5-11)$$

$$Q_{SH1b} = (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (3117,815 - 3006,815) = 5672,7216 \text{ kW}$$

### 5.4.9 Přehřívák SH2

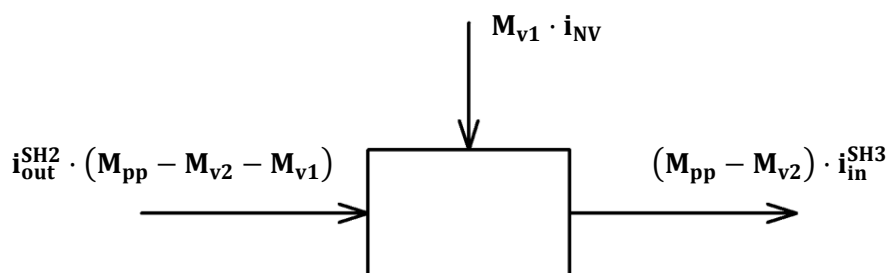
Tabulka 22: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH2}$	404,4	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH2}$	465,2	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH2}$	9,67	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH2}$	9,55	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH2}$	3117,815	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH2}$	3290,109	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Teplný výkon přehříváku SH2

$$Q_{SH2} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i_{out}^{SH2} - i_{in}^{SH2}) \quad (5-12)$$

$$Q_{SH2} = (55,5556 - 2,43 - 3,95) \cdot (3297,8152 - 3117,8152) = 8851,6080 \text{ kW}$$

**Bilance vstříku**

Obrázek 2: Schéma vstříku 1

$$i_{out}^{SH2} \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) + M_{v1} \cdot i_{NV} = (M_{pp} - M_{v2}) \cdot i_{in}^{SH3}$$

**Entalpie na výstupu**

$$i_{out}^{SH2} = \frac{(M_{pp} - M_{v2}) \cdot i_{in}^{SH3} - M_{v1} \cdot i_{NV}}{M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}} \quad (5-13)$$

$$i_{out}^{SH2} = \frac{(55,5556 - 0,5) \cdot 3093,762 - 3,95 \cdot 553,400}{55,5556 - 0,5 - 3,95}$$

$$i_{out}^{SH2} = 3290,109 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**5.4.10 Přejířivák SH3A**

Tabulka 23: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH3A

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH3a}$	395,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH3a}$	435,2	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH3a}$	9,55	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH3a}$	9,53	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH3a}$	3093,698	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH3a}$	3209,143	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**Tepelný výkon přejířiváku SH3A**

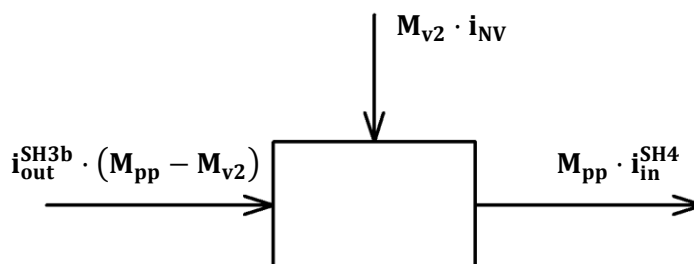
$$Q_{SH3a} = (M_{pp} - M_{v2}) \cdot (i_{out}^{SH3a} - i_{in}^{SH3a}) \quad (5-14)$$

$$Q_{SH3a} = (55,5556 - 0,5) \cdot (3209,143 - 3093,698) = 6355,8937 \text{ kW}$$

**5.4.11 Přejířivák SH3B**

Tabulka 24: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH3B

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH3b}$	435,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH3b}$	470	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH3b}$	9,53	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH3b}$	9,51	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH3b}$	3209,143	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH3b}$	3305,771	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**Bilance vstřiku**

Obrázek 3: Schéma vstřiku 2

$$i_{out}^{SH3b} \cdot (M_{pp} - M_{v2}) + M_{v2} \cdot i_{NV} = M_{pp} \cdot i_{in}^{SH4}$$

**Entalpie na výstupu**

$$i_{out}^{SH3b} = \frac{M_{pp} \cdot i_{in}^{SH4} - M_{v2} \cdot i_{NV}}{M_{pp} - M_{v2}} \quad (5-15)$$

$$i_{out}^{SH3b} = \frac{55,5556 \cdot 3281 - 0,5 \cdot 553,4000}{55,5556 - 0,5}$$

$$i_{out}^{SH3b} = 3305,771 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Tepelný výkon přehříváku SH3B**

$$Q_{SH3b} = (M_{pp} - M_{v2}) \cdot (i_{out}^{SH3b} - i_{in}^{SH3b}) \quad (5-16)$$

$$Q_{SH3b} = (55,5556 - 0,5) \cdot (3305,7710 - 3209,1430) = 5319,9125 \text{ kW}$$

**5.4.12 Přehřívák SH4**

Tabulka 25: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH4

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{SH4}$	461,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{SH4}$	520	°C
Tlak na vstupu	$p_{in}^{SH4}$	9,51	MPa	Tlak na výstupu	$p_{out}^{SH4}$	9,3	MPa
Entalpie na vstupu	$i_{in}^{SH4}$	3281	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie na výstupu	$i_{out}^{SH4}$	3433	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**Tepelný výkon přehříváku SH4**

$$Q_{SH4} = M_{pp} \cdot (i_{out}^{SH4} - i_{in}^{SH4}) = 55,5556 \cdot (3433 - 3281) = 8444,4512 \text{ kW} \quad (5-17)$$

## 5.5 Celkový tepelný výkon

$$\sum Q_i = Q_{EKO1} + Q_{EKO2} + Q_{EKO3} + Q_{VYP} + Q_{SH1A} + Q_{SH1B} + Q_{SH2} + Q_{SH3a} + Q_{SH3b} + Q_{SH4}$$

$$\sum Q_i = 3512,6516 + 5102,5251 + 7019,9822 + 95567,0501 + 14662,9632 + 5672,7216 + 8851,6080 + 6355,8937 + 5319,9125 + 8444,4512$$

$$\sum Q_i = 160508,7 \text{ kW} = 160,5087 \text{ MW} \quad (5-18)$$

Tabulka 26: Tepelná bilance na straně média pro hnědé uhlí

Tepelná bilance na straně média											
		t [°C]	p [MPa]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]	Q [kW]			t [°C]	p [MPa]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]	Q [kW]
EKO1	vstup	130	10,65	553,4	3512,6516	SH2	vstup	404,4	9,67	3117,815	8851,608
	výstup	146	10,49	621,394			výstup	465,2	9,55	3290,109	
EKO2	vstup	146	10,49	621,394	5102,5251	SH3A	vstup	395,6	9,55	3093,698	6355,8937
	výstup	169	10,33	720,163			výstup	432,6	9,53	3209,143	
EKO3	vstup	169	10,33	720,163	7019,9822	SH3B	vstup	432,6	9,53	3209,143	5319,9125
	výstup	200	10,30	856,048			výstup	470	9,51	3305,771	
VYP	vstup	313,2	10,30	1420,800	95567,05	SH4	vstup	461,6	9,51	3281	8444,4512
	výstup			2719,900			výstup	520	9,30	3433	
SH1A	vstup	313,2	10,30	2719,900	14662,9632	AH1	vstup	100		795,967	3703,6331
	výstup	371,2	9,87	3006,815			výstup	150		1198,339	
SH1B	vstup	371,2	9,87	3006,815	5672,7216	AH2	vstup	150		1198,339	6719,0917
	výstup	404,4	9,67	3117,815			výstup	240		1928,318	

Tabulka 27: Tepelná bilance na straně média pro dřevní štěpku

Tepelná bilance na straně média											
		t [°C]	p [MPa]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]	Q [kW]			t [°C]	p [MPa]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]	Q [kW]
EKO1	vstup	130	10,65	553,4	3512,6516	SH2	vstup	404,4	9,67	3117,815	8851,608
	výstup	146	10,49	621,394			výstup	465,2	9,55	3290,109	
EKO2	vstup	146	10,49	621,394	5102,5251	SH3A	vstup	395,6	9,55	3093,698	6355,8937
	výstup	169	10,33	720,163			výstup	432,6	9,53	3209,143	
EKO3	vstup	169	10,33	720,163	7019,9822	SH3B	vstup	432,6	9,53	3209,143	5319,9125
	výstup	200	10,30	856,048			výstup	470	9,51	3305,771	
VYP	vstup	313,2	10,30	1420,800	95567,05	SH4	vstup	461,6	9,51	3281	8444,4512
	výstup			2719,900			výstup	520	9,30	3433	
SH1A	vstup	313,2	10,30	2719,900	14662,9632	AH1	vstup	100		467,639	3125,8217
	výstup	371,2	9,87	3006,815			výstup	150		704,037	
SH1B	vstup	371,2	9,87	3006,815	5672,7216	AH2	vstup	150		704,037	5670,8408
	výstup	404,4	9,67	3117,815			výstup	240		1132,907	

## 5.6 Tepelná bilance na straně spalin

Následující kapitola obsahuje výpočet teploty spalin na vstupu a na výstupu z jednotlivých výhřevných ploch. V první části výpočtu je určena entalpie spalin, ze které je následně pomocí extrapolace určena daná teplota spalin z tabulky 4 resp. z tabulky 7.

Entalpie na poslední konvekční ploše i její odpovídající teplota je rovna teplotě na výstupu z ohniště.

### Ukázkový výpočet teploty spalin pro AH1 – hnědé uhlí

$$I_{sp\ in}^{AH1} = \frac{Q_{AH1} + M_{pv} \cdot I_{sp\ out}^{AH1}}{M_{pv}} = \frac{3703,6331 + 7,3636 \cdot 1940,99}{7,3636} = 2443,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5-19)$$

$$I_{sp\ in}^{AH1} = 2443,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \Rightarrow t_{sp\ in}^{AH1} = 206,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabulka 28: Tepelná bilance na straně spalin pro dřevní štěpku

Tepelná bilance na straně spalin							
		t [°C]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]			t [°C]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]
AH1	vstup	206,1	2443,96	SH1B	vstup	654,7	8241,39
	výstup	160	1940,99		výstup	598,2	7471,02
EKO1	vstup	244,8	2920,99	MŘÍŽ	vstup	667,3	8413,83
	výstup	206,1	2443,96		výstup	654,7	8241,39
EKO2	vstup	301,1	3613,93	SH2	vstup	754,6	9615,91
	výstup	244,8	2920,99		výstup	667,3	8413,83
AH2	vstup	373,2	4526,40	SH4	vstup	836,5	10762,69
	výstup	301,1	3613,93		výstup	754,6	9615,91
EKO3	vstup	447,3	5479,74	SH3	vstup	948	12348,30
	výstup	373,2	4526,40		výstup	836,5	10762,69
SH1A	vstup	598,2	7471,02				
	výstup	447,3	5479,74				

Tabulka 29: Tepelná bilance na straně spalin pro dřevní štěpku

Tepelná bilance na straně spalin							
		t [°C]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]			t [°C]	I [kJ · kg <sup>-1</sup> ]
AH1	vstup	201,2	1570,12	SH1B	vstup	662,4	5506,68
	výstup	160	1274,62		výstup	603	4970,41
EKO1	vstup	242,1	1902,18	MŘÍŽ	vstup	675,5	5624,81
	výstup	201,2	1570,11		výstup	662,4	5506,68
EKO2	vstup	301,5	2384,54	SH2	vstup	767,1	6461,59
	výstup	242,1	1902,18		výstup	675,5	5624,81
AH2	vstup	365,7	2920,63	SH4	vstup	852,9	7259,88
	výstup	301,5	2384,54		výstup	767,1	6461,59
EKO3	vstup	444	3584,26	SH3	vstup	969	8363,64
	výstup	365,7	2920,63		výstup	852,9	7259,88
SH1A	vstup	603	4970,41				
	výstup	444	3584,26				

### 5.6.1 Teploty a entalpie spalin na výstupu z jednotlivých částí deskového přehříváku

Jelikož konvekční plocha SH3 je rozdělená na dvě části, je nutné ohledně dalších výpočtů určit entalpie a následné teploty spalin na výstupu z těchto částí.

#### Hnědé uhlí

$$I_{sp\ out}^{SH3A} = \frac{I_{sp\ in}^{SH3A} \cdot M_{pv} - Q_{SH3A}}{M_{pv}} = \frac{12348,30 \cdot 7,3636 - 6355,8937}{7,3636} = 11485,15 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5-20)$$

- této entalpii odpovídá teplota spalin na výstupu z SH3A:  $t_{sp\ out}^{SH3A} = 888,5 \text{ °C}$

$$I_{sp\ out}^{SH3B} = \frac{I_{sp\ in}^{SH3B} \cdot M_{pv} - Q_{SH3B}}{M_{pv}} = \frac{12348,30 \cdot 7,3636 - 5319,9125}{7,3636} = 11625,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5-21)$$

- této entalpii odpovídá teplota spalin na výstupu z SH3B:  $t_{sp\ out}^{SH3B} = 898,5 \text{ °C}$

#### Dřevní štěpka

$$I_{sp\ out}^{SH3A} = \frac{I_{sp\ in}^{SH3A} \cdot M_{pv} - Q_{SH3A}}{M_{pv}} = \frac{8363,64 \cdot 10,5782 - 6355,8937}{10,5782} = 7762,79 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5-22)$$

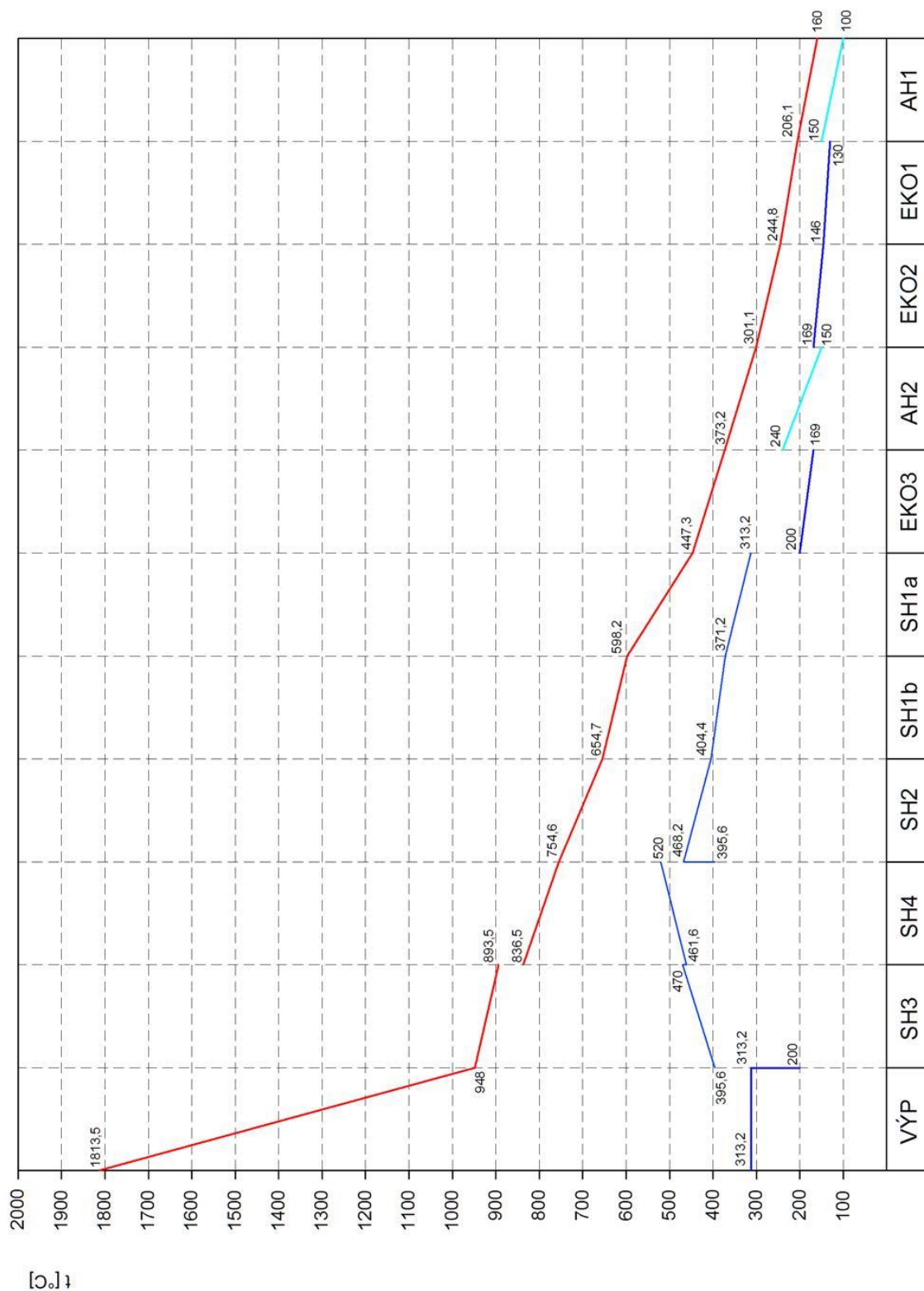
- této entalpii odpovídá teplota spalin na výstupu z SH3A:  $t_{sp\ out}^{SH3A} = 906,3 \text{ °C}$

$$I_{sp\ out}^{SH3B} = \frac{I_{sp\ in}^{SH3B} \cdot M_{pv} - Q_{SH3B}}{M_{pv}} = \frac{8363,64 \cdot 10,5782 - 5319,9125}{10,5782} = 7860,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5-23)$$

- této entalpii odpovídá teplota spalin na výstupu z SH3B:  $t_{sp\ out}^{SH3B} = 916,6 \text{ °C}$

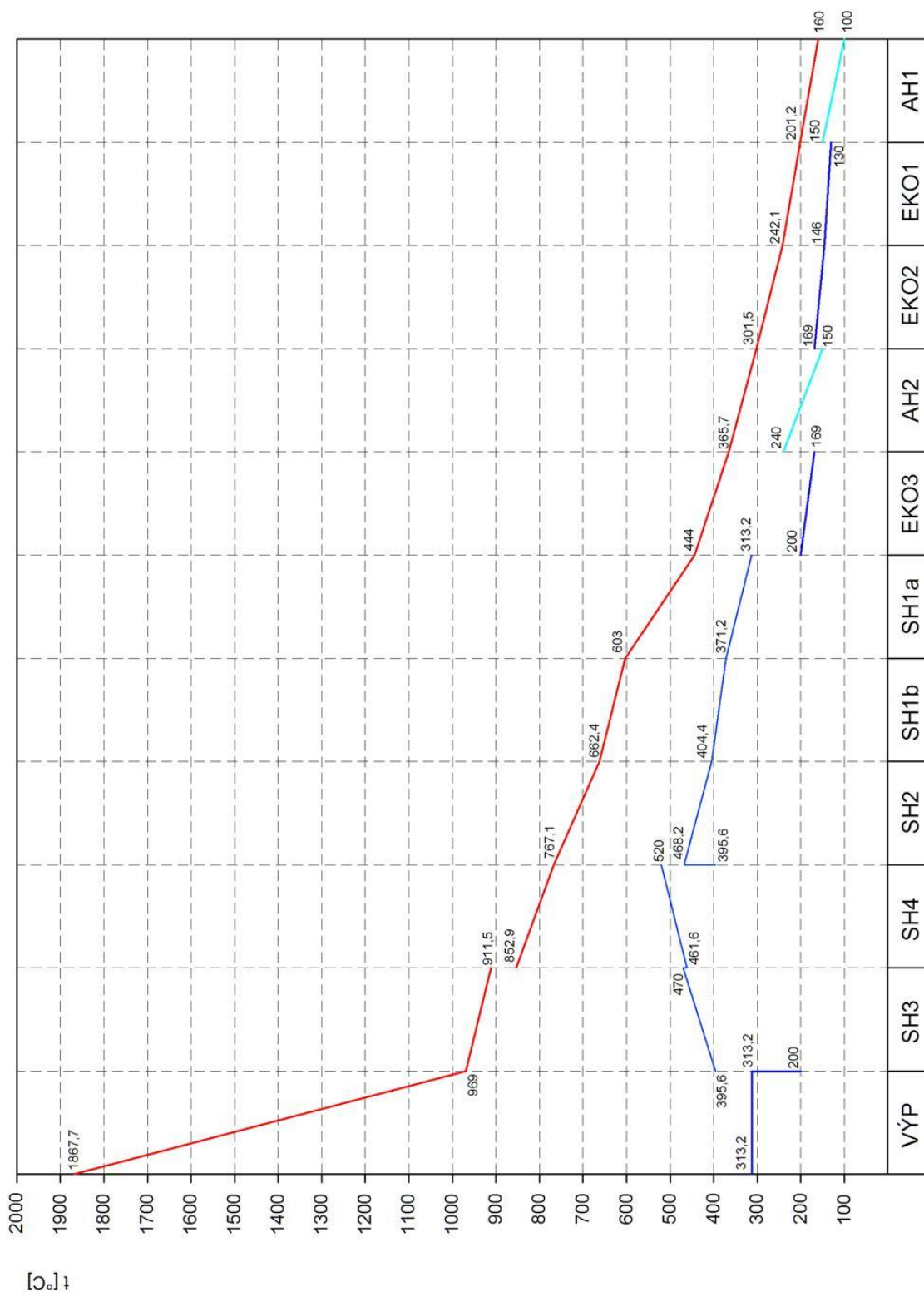
## 5.7 Pilové diagramy

### 5.7.1 Hnědé uhlí



Obrázek 4: Pilový diagram pro hnědé uhlí

### 5.7.2 Dřevní štěpka



Obrázek 5: Pilový diagram pro dřevní štěpku

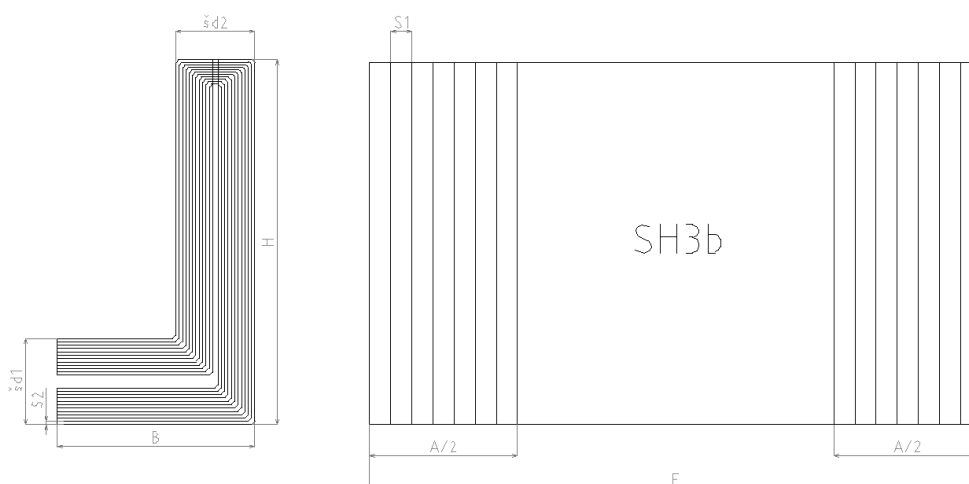


## 6 Výpočet konvekčních ploch – hnědé uhlí

### 6.1 Deskový přehřívák SH3A

Přehřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných do desek. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

#### 6.1.1 Návrh geometrie



Obrázek 6: Geometrie přehříváku SH3A

#### Návrh geometrie deskového přehříváku

Vnější průměr trubky:	$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0333 \text{ m}$
Příčná rozteč (vzdálenost mezi deskami):	$s_1 = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$
Podélná rozteč:	$s_2 = 53 \text{ mm} = 0,053 \text{ m}$

#### Geometrie spalínového kanálu

Výška spalínového kanálu:	$H = 6008 \text{ mm} = 6,008 \text{ m}$
Šířka spalínového kanálu:	$A = 7070 \text{ mm} = 7,070 \text{ m}$
Délka spalínového kanálu:	$B = 3079 \text{ mm} = 3,079 \text{ m}$
Celková šířka:	$E = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$

$$\text{Uzavřená plocha stěn: } S_{st} = 2 \cdot [(H \cdot B) + (B \cdot A) + (A \cdot H)] \quad (6-1)$$

$$S_{st} = 2 \cdot [(6,008 \cdot 3,079) + (3,079 \cdot 7,070) + (7,070 \cdot 6,008)]$$

$$S_{st} = 165,4874 \text{ m}^2$$

**Geometrie desek deskového přehříváku SH3A**Počet trubek v desce:  $z_2 = 12$  trubekPočet desek:  $n_d = 16$  desekCelkový počet trubek:  $n_{tr} = z_2 \cdot n_d = 12 \cdot 16 = 192$  trubek (6-2)Příčná šířka desky:  $s_{d1} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,176$  (6-3)

$$s_{d1} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,176 = 1,342 \text{ m}$$

Podélná šířka desky:  $s_{d2} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,100$  (6-4)

$$s_{d2} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,100 = 1,266 \text{ m}$$

Plocha 1 desky:

$$S_d = 2 \cdot [s_{d1} \cdot B + (H - s_{d1}) \cdot s_{d2}] + D \cdot (2 \cdot H + 2 \cdot B - s_{d2})$$
 (6-5)

$$S_d = 2 \cdot [1,342 \cdot 3,079 + (6,008 - 1,342) \cdot 1,266] + 0,0445 \cdot (2 \cdot 6,008 + 2 \cdot 3,079 - 1,266)$$

$$S_d = 20,8307 \text{ m}^2$$

Plocha desek:  $S_{SH3A} = S_d \cdot n_d = 20,8307 \cdot 16 = 333,2920 \text{ m}^2$  (6-6)**Parametry média**

Tabulka 30: Parametry média deskového přehříváku SH3A

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	395,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	435,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02761	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03047	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 31: Parametry spalin deskového přehříváku SH3A pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	948	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	888,5	°C

**Střední hodnoty**Střední měrný objem:  $v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02761 + 0,03047}{2} = 0,02904 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (6-7)Střední teplota média:  $t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{395,6 + 435,2}{2} = 415,4 \text{ °C}$  (6-8)

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{948 + 888,5}{2} = 918,25 \text{ °C} \quad (6-9)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{\text{stř}}^{\text{st}} = \frac{t_{\text{stř}}^{\text{par}} + t_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{415,4 + 918,25}{2} = 666,825 \text{ °C} \quad (6-10)$$

### Skutečný průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{b}}}{p_{\text{b}} - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (6-11)$$

$$V_{\text{sp}} = \frac{8,5711}{2} \cdot \frac{918,25 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,2} \cdot 7,3636$$

$$V_{\text{sp}} = 137,9149 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{\text{sp}}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_{\text{b}}$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{\text{sp}}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

### Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{F_{\text{sp}}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{A \cdot B \cdot (s_1 - D)} = \frac{137,9149 \cdot 0,425}{7,070 \cdot 3,079 \cdot (0,425 - 0,0445)} = 7,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-12)$$

### Rychlost páry

$$w_{\text{par}} = \frac{4 \cdot (M_{\text{pp}} - M_{\text{v2}}) \cdot v_{\text{stř}}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{tr}}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5) \cdot 0,02904}{\pi \cdot 0,03332^2 \cdot 192} = 9,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-13)$$

## 6.1.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot B - n_{\text{tr}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{2 \cdot (A + B) + n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot 7,070 \cdot 3,079 - 192 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4}}{2 \cdot (7,070 + 3,079) + 192 \cdot \pi \cdot 0,0445} = 1,8408 \text{ m} \quad (6-14)$$

### Poměrný objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (6-15)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Z hodnot objemu vodní páry ve spalinách vycházejí hodnoty součinitele tepelné vodivosti, kinematické viskozity a Prandtlova čísla. [1]

Tabulka 32: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3A pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,1006	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,5881	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání trubek**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-16)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2344 \cdot \frac{0,1006}{0,0445} \cdot \left( \frac{7,08 \cdot 0,0445}{1,56 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,5881^{0,33} = 12,5190 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 9,5505 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,1910}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,2344 \quad (6-17)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,425}{0,0445} = 9,5505 \quad (6-18)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,053}{0,0445} = 1,1910 \quad (6-19)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při podélném obtékání trubek**

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-20)$$

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{0,1006}{1,8408} \cdot \left( \frac{7,08 \cdot 1,8408}{1,56 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5881^{0,4} = 8,4127 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**6.1.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 33: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3A pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$69,32 \cdot 10^{-3}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$2,49 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$7,238 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,086	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-21)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,1258 \cdot \frac{0,06932}{0,0333} \cdot \left( \frac{9,56 \cdot 0,0333}{7,238 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,086^{0,4} = 1822,0579 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{918,25 + 273,15}{666,825 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,1258 \quad (6-22)$$

### 6.1.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6-23)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2340 \cdot (918,25 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{510,7 + 273,15}{918,25 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{510,7 + 273,15}{918,25 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sál} = 48,2384 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalín při teplotě spalín	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalín	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalín	[K]

### Velikost sálavé plochy

$$S_{sál} = S_{SH3A} \cdot x = 333,2920 \cdot 0,95 = 316,6274 \text{ m}^2 \quad (6-24)$$

$x$  – součinitel úhlového osálení desek [1]

### Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH3A}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (6-25)$$

$$t_z = 415,4 + \left( 0,0042 + \frac{1}{1822,0579} \right) \cdot \frac{6355,8937}{316,6274} \cdot 10^3 = 510,7 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$  – součinitel zanesení [1] [m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>]

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{A \cdot B \cdot H}{S_{SH3A} + S_{st}} = \frac{7,070 \cdot 3,079 \cdot 6,008}{333,2920 + 165,4874} = 0,9440 \text{ m} \quad (6-26)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-27)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-28)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-29)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,9440}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{918,25 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 2,2869 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (6-30)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-31)$$

**Součinitel zeslabení sálení popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(918,25 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,5379 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-32)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (2,2869 + 0,5379) \cdot 0,1 \cdot 0,9440 = 0,2666 \quad (6-33)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2666} = 0,2340 \quad (6-34)$$

**6.1.5 Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla**

součinitel využití deskového přehříváku  $\xi = 0,83$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění**

$$\alpha_{spř} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,př} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (6-35)$$

$$\alpha_{spř} = 0,83 \cdot \left( 12,5190 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 48,2384 \right) = 55,4632 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

$$\alpha_{spod} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,pod} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (6-36)$$

$$\alpha_{spod} = 0,83 \cdot \left( 8,8030 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 48,2384 \right) = 51,1814 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Podíl tepla vysálaného z ohniště předaného do deskového přehříváku**

$$m = \frac{Q_{ods}}{Q_{SH3A}} = \frac{5212,0065}{6355,8937} = 0,4100 \quad (6-37)$$

**Součinitel prostupu tepla pro příčné proudění**

$$k_{př} = \frac{\alpha_{spř}}{1 + \alpha_{spř} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (6-38)$$

$$k_{př} = \frac{55,4632}{1 + 55,4632 \cdot \left( 0,0042 + \frac{1}{1822,0579} \right) \cdot (1 + 0,4100)} = 40,4435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k_{pod} = \frac{\alpha_{spod}}{1 + \alpha_{spod} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (6-39)$$

$$k_{pod} = \frac{51,1814}{1 + 51,1814 \cdot \left( 0,0042 + \frac{1}{1822,0579} \right) \cdot (1 + 0,4100)} = 38,1182 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

Plocha omývaná příčně  $S_{př} = 0,7 \cdot S_{sál} = 0,7 \cdot 316,6274 = 221,6392 \text{ m}^2 \quad (6-40)$

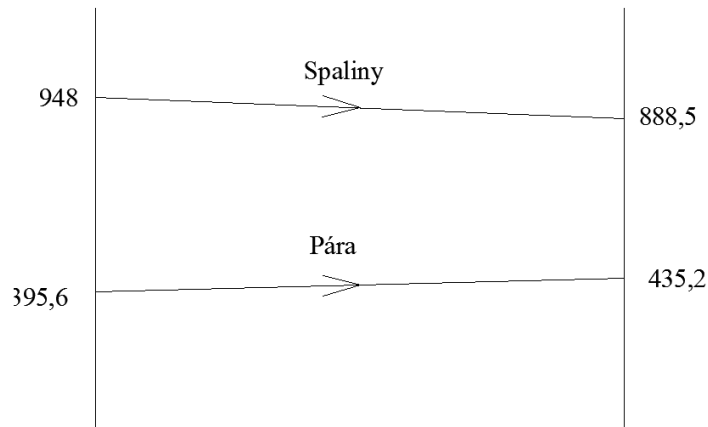
Plocha omývaná podélně  $S_{pod} = 0,3 \cdot S_{sál} = 0,3 \cdot 316,6274 = 94,9882 \text{ m}^2 \quad (6-41)$

$$k = \frac{k_{\text{pod}} \cdot S_{\text{pod}} + k_{\text{př}} \cdot S_{\text{př}}}{S_{\text{sál}}} \quad (6-42)$$

$$k = \frac{38,1182 \cdot 94,9882 + 40,4435 \cdot 221,6392}{316,6274} = 39,7459 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 6.1.6 Tepelný výkon deskového přehříváku SH3A

#### Střední teplotní spád



Obrázek 7: Teplotní spád SH3A

$$\Delta t = (t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t_{\text{stř}}^{\text{par}}) = (918,25 - 415,4) = 502,85 \text{ °C} \quad (6-43)$$

#### Tepelný výkon SH3A

$$Q_b^{\text{SH3A}} = S_{\text{sál}} \cdot k \cdot \Delta t = 316,6274 \cdot 39,7459 \cdot 502,85 = 6328,1867 \text{ kW} \quad (6-44)$$

#### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{SH3A}} - Q_{\text{SH3A}}}{Q_b^{\text{SH3A}}} = \frac{6328,1867 - 6355,8937}{6328,1867} = -0,437 \% \quad (6-45)$$



## 6.1.7 Výpočet výkonu paralelních ploch

### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet trubek:} \quad n_{\text{tr}}^{\text{par}} = 96$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot B - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}2}}{4}}{2 \cdot (A + B) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 7,070 \cdot 3,079 - 96 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (7,070 + 3,079) + 96 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 1,3772 \text{ m} \quad (6-46)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (6-47)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,1006}{1,3772} \cdot \left( \frac{7,08 \cdot 1,3772}{1,56 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5881^{0,4} = 9,3290 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 48,2384 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-48)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (6-49)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 9,3290 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 48,2384 \right) = 49,6250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  - součinitel využití [1] [-]

$x^{\text{par}}$  - součinitel úhlového osálení [1] [-]

### Součinitel prostupu tepla

#### Podíl z tepla vysálaného z ohniště předaného do stěn

$$m^{\text{par}} = \frac{Q_{\text{ods}}}{Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}} = \frac{1 \cdot 5212,0065}{2 \cdot 1050} = 1,2410 \quad (6-50)$$

kde:

$Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}$  – odhadnutý výkon paralelních ploch [kW]

**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}} \cdot (1 + m^{\text{par}})} \quad (6-51)$$

$$k^{\text{par}} = \frac{49,6250}{1 + 49,6250 \cdot 0,0042 \cdot (1 + 1,2410)} = 33,8257 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$$\varepsilon^{\text{par}} \quad - \text{ součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Velikost sálové plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = \frac{[(A \cdot H) + (A \cdot B) + 2 \cdot (H \cdot B)]}{2} \cdot x \quad (6-52)$$

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = \frac{[(7,070 \cdot 6,008) + (7,070 \cdot 3,079) + 2 \cdot (6,008 \cdot 3,079)]}{2} \cdot 0,9 = 45,5591 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{\text{ln}} = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{sy}} = 918,25 - 313,2 = 605,05 \text{ °C} \quad (6-53)$$

**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_{\text{b}}^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 45,5591 \cdot 33,8257 \cdot 605,05 = 1032,4340 \text{ kW} \quad (6-54)$$

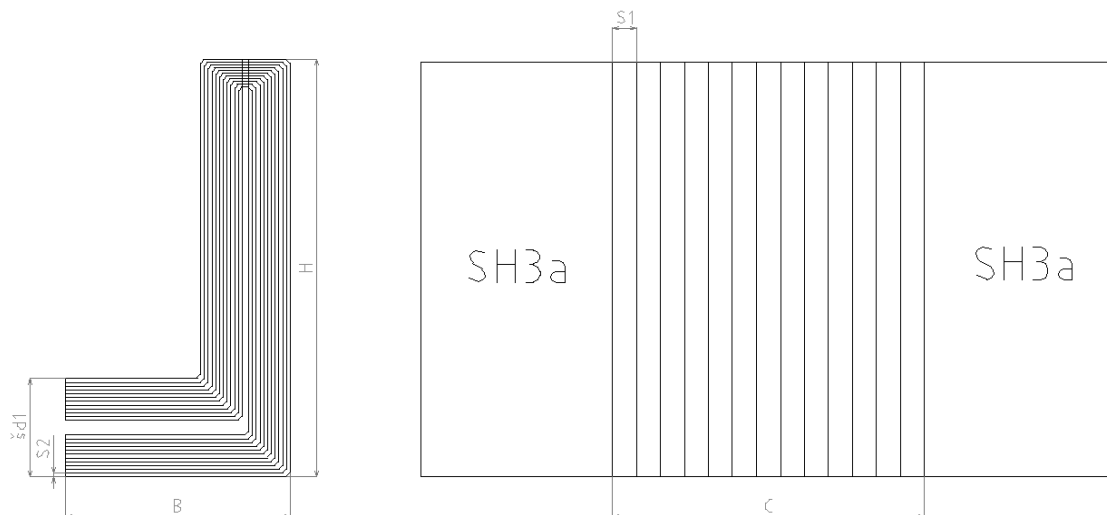
**Celkový výkon paralelních ploch**

$$Q_{\text{b,celk}}^{\text{par}} = 2 \cdot Q_{\text{b}}^{\text{par}} = 2 \cdot 1032,4340 = 2064,8469 \text{ kW} \quad (6-55)$$

## 6.2 Deskový přehřívák SH3B

Přehřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných do desek. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

### 6.2.1 Návrh geometrie



Obrázek 8: Geometrie přehříváku SH3B

### Návrh geometrie deskového přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0333 \text{ m}$$

Příčná rozteč (vzdálenost mezi deskami):

$$s_1 = 425 \text{ mm} = 0,425 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 53 \text{ mm} = 0,053 \text{ m}$$

### Geometrie spalínového kanálu

Výška spalínového kanálu:

$$H = 6008 \text{ mm} = 6,008 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$C = 5950 \text{ mm} = 5,950 \text{ m}$$

Délka spalínového kanálu:

$$B = 3079 \text{ mm} = 3,079 \text{ m}$$

Uzavřená plocha stěn:

$$S_{st} = 2 \cdot [(H \cdot B) + (B \cdot A) + (A \cdot H)] \quad (6-56)$$

$$S_{st} = 2 \cdot [(6,008 \cdot 3,079) + (3,079 \cdot 5,950) + (5,950 \cdot 6,008)]$$

$$S_{st} = 145,1326 \text{ m}^2$$

**Geometrie desek deskového přehříváku SH3B**Počet trubek v desce:  $z_2 = 12$  trubekPočet desek:  $n_d = 14$  desekCelkový počet trubek:  $n_{tr} = z_2 \cdot n_d = 12 \cdot 14 = 168$  trubek (6-57)Příčná šířka desky:  $s_{d1} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,176$  (6-58)

$$s_{d1} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,176 = 1,342 \text{ m}$$

Podélná šířka desky:  $s_{d2} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,100$  (6-59)

$$s_{d2} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,100 = 1,266 \text{ m}$$

Plocha 1 desky:

$$S_d = 2 \cdot [s_{d1} \cdot B + (H - s_{d1}) \cdot s_{d2}] + D \cdot (2 \cdot H + 2 \cdot B - s_{d2}) \quad (6-60)$$

$$S_d = 2 \cdot [1,342 \cdot 3,079 + (6,008 - 1,342) \cdot 1,266] + 0,0445 \cdot (2 \cdot 6,008 + 2 \cdot 3,079 - 1,266)$$

$$S_d = 20,8307 \text{ m}^2$$

Plocha desek:  $S_{SH3B} = S_d \cdot n_d = 20,8307 \cdot 14 = 291,6298 \text{ m}^2$  (6-61)**Parametry média**

Tabulka 34: Parametry média deskového přehříváku SH3B

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	435,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	470	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,03047	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,0328	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 35: Parametry spalin deskového přehříváku SH3B pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	948	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	898,5	°C

**Střední hodnoty**Střední měrný objem:  $v_{str} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,03047 + 0,0328}{2} = 0,03164 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (6-62)Střední teplota média:  $t_{str}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{435,2 + 470}{2} = 452,6 \text{ °C}$  (6-63)

$$\text{Střední teplota spalin:} \quad t_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{948 + 898,5}{2} = 923,25 \text{ °C} \quad (6-64)$$

$$\text{Střední teplota stěny:} \quad t_{\text{stř}}^{\text{st}} = \frac{t_{\text{stř}}^{\text{par}} + t_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{452,6 + 923,25}{2} = 687,925 \text{ °C} \quad (6-65)$$

### Skutečný průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{b}}}{p_{\text{b}} - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (6-66)$$

$$V_{\text{sp}} = \frac{8,5711}{2} \cdot \frac{923,25 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,2} \cdot 7,3636$$

$$V_{\text{sp}} = 138,4937 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{\text{sp}}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_{\text{b}}$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{\text{sp}}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

### Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{F_{\text{sp}}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{C \cdot B \cdot (s_1 - D)} = \frac{138,4937 \cdot 0,425}{5,950 \cdot 3,079 \cdot (0,425 - 0,0445)} = 8,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-67)$$

### Rychlost páry

$$w_{\text{par}} = \frac{4 \cdot (M_{\text{pp}} - M_{\text{v2}}) \cdot v_{\text{stř}}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{tr}}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5) \cdot 0,03164}{\pi \cdot 0,0333^2 \cdot 168} = 11,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-68)$$

## 6.2.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot C \cdot B - n_{\text{tr}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{2 \cdot (C + B) + n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot 5,950 \cdot 3,079 - 168 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4}}{2 \cdot (5,950 + 3,079) + 168 \cdot \pi \cdot 0,0445} = 1,7576 \text{ m} \quad (6-69)$$

### Poměrný objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (6-70)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 36: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3B pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,1011	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,5876	[-]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání trubek**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-71)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2344 \cdot \frac{0,1011}{0,0445} \cdot \left( \frac{8,44 \cdot 0,0445}{1,57 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,5876^{0,33} = 14,0410 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 9,5505 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,1910}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,2344 \quad (6-72)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,425}{0,0445} = 9,5505 \quad (6-73) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,053}{0,0445} = 1,1910 \quad (6-74)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při podélném obtékání trubek**

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-75)$$

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{0,1011}{1,7576} \cdot \left( \frac{8,44 \cdot 1,7576}{1,57 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5876^{0,4} = 10,2207 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**6.2.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 37: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3B pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$72,42 \cdot 10^{-3}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$8,450 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,005	[-]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-76)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,1157 \cdot \frac{0,07242}{0,0333} \cdot \left( \frac{11,91 \cdot 0,0333}{8,450 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,005^{0,4} = 1926,4397 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{923,25 + 273,15}{687,925 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,1157 \quad (6-77)$$

### 6.2.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6-78)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2287 \cdot (923,25 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{543,2 + 273,15}{923,25 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{543,2 + 273,15}{923,25 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 49,5379 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

### Velikost sálavé plochy

$$S_{sál} = S_{SH3B} \cdot x = 291,6298 \cdot 0,95 = 277,0483 \text{ m}^2 \quad (6-79)$$

$x$  – součinitel úhlového osálení desek [1] [–]

### Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH3B}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (6-80)$$

$$t_z = 452,6 + \left( 0,0042 + \frac{1}{1926,4397} \right) \cdot \frac{5319,9125}{277,0483} \cdot 10^3 = 543,2 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$  – součinitel zanesení [1]  $[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$

### Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{C \cdot B \cdot H}{S_{SH3B} + S_{st}} = \frac{5,950 \cdot 3,079 \cdot 6,008}{291,6298 + 145,1326} = 0,9072 \text{ m} \quad (6-81)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-82)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-83)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-84)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,9072}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{923,25 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 2,3257 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (6-85)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-86)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(923,25 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,5364 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-87)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (2,3257 + 0,5364) \cdot 0,1 \cdot 0,9072 = 0,2596 \quad (6-88)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2596} = 0,2287 \quad (6-89)$$

**6.2.5 Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla**

součinitel využití deskového přehříváku  $\xi = 0,83$



**Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění**

$$\alpha_{\text{spř}} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,\text{př}} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{\text{sál}} \right) \quad (6-90)$$

$$\alpha_{\text{spř}} = 0,83 \cdot \left( 14,0410 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 49,5379 \right) = 58,2956 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

$$\alpha_{\text{spod}} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,\text{pod}} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{\text{sál}} \right) \quad (6-91)$$

$$\alpha_{\text{spod}} = 0,83 \cdot \left( 10,2207 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 49,5379 \right) = 53,8936 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Podíl tepla vysálaného z ohniště předaného do deskového přehříváku**

$$m = \frac{Q_{\text{ods}}}{Q_{\text{SH3B}}} = \frac{\frac{5212,0065}{2}}{5319,9125} = 0,4899 \quad (6-92)$$

**Součinitel prostupu tepla pro příčné proudění**

$$k_{\text{př}} = \frac{\alpha_{\text{spř}}}{1 + \alpha_{\text{spř}} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (6-93)$$

$$k_{\text{př}} = \frac{58,2956}{1 + 58,2956 \cdot \left( 0,0042 + \frac{1}{1926,4397} \right) \cdot (1 + 0,4899)} = 41,3481 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k_{\text{pod}} = \frac{\alpha_{\text{spod}}}{1 + \alpha_{\text{spod}} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (6-94)$$

$$k_{\text{pod}} = \frac{53,8936}{1 + 53,8936 \cdot \left( 0,0042 + \frac{1}{1926,4397} \right) \cdot (1 + 0,4899)} = 39,0838 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$\text{Plocha omývaná příčně} \quad S_{\text{př}} = 0,7 \cdot S_{\text{sál}} = 0,7 \cdot 277,0483 = 193,9338 \text{ m}^2 \quad (6-95)$$

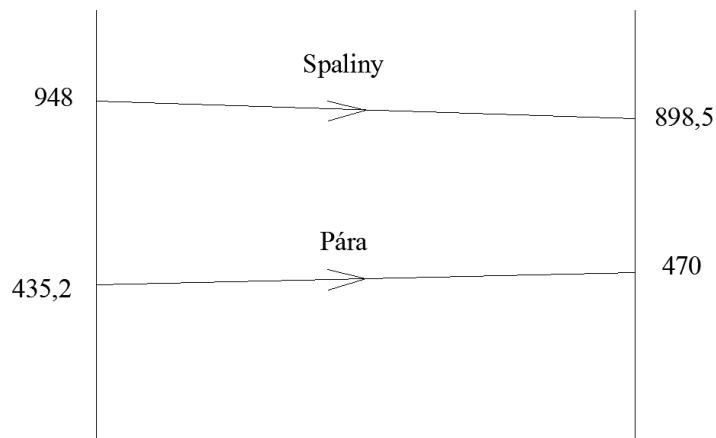
$$\text{Plocha omývaná podélně} \quad S_{\text{pod}} = 0,3 \cdot S_{\text{sál}} = 0,3 \cdot 277,0483 = 83,1145 \text{ m}^2 \quad (6-96)$$

$$k = \frac{k_{\text{pod}} \cdot S_{\text{pod}} + k_{\text{př}} \cdot S_{\text{př}}}{S_{\text{sál}}} \quad (6-97)$$

$$k = \frac{39,0838 \cdot 83,1145 + 41,3481 \cdot 193,9338}{277,0483} = 40,6688 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

## 6.2.6 Tepelný výkon deskového přehřívačů SH3B

### Střední teplotní spád



Obrázek 9: Teplotní spád SH3B

$$\Delta t = (t_{stř}^{sp} - t_{stř}^{par}) = (923,25 - 452,6) = 470,65 \text{ °C} \quad (6-98)$$

### Tepelný výkon SH3B

$$Q_b^{SH3B} = S_{sál} \cdot k \cdot \Delta t = 277,0483 \cdot 40,6688 \cdot 470,65 = 5302,9180 \text{ kW} \quad (6-99)$$

### Kontrola

$$\frac{Q_b^{SH3B} - Q_{SH3B}}{Q_b^{SH3B}} = \frac{5302,9180 - 5319,9125}{5302,9180} = -0,32 \text{ \%} \quad (6-100)$$

## 6.2.7 Výkon paralelních ploch

### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet trubek:} \quad n_{\text{tr}}^{\text{par}} = 84$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot C \cdot B - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}^2}}{4}}{2 \cdot (C + B) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 5,950 \cdot 3,079 - 84 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (5,950 + 3,079) + 84 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 2,1501 \text{ m} \quad (6-101)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (6-102)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,1011}{2,1501} \cdot \left( \frac{8,44 \cdot 2,1501}{1,57 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5876^{0,4} = 9,8169 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 49,5379 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-103)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (6-104)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 9,8169 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 49,5379 \right) = 51,2050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

### Součinitel prostupu tepla

#### Podíl z tepla vysálaného z ohniště předaného do stěn

$$m^{\text{par}} = \frac{Q_{\text{ods}}}{Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}} = \frac{5212,0065}{750} = 3,4747 \quad (6-105)$$

kde:

$Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}$  – odhadnutý výkon paralelních ploch [kW]

**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}} \cdot (1 + m^{\text{par}})} \quad (6-106)$$

$$k^{\text{par}} = \frac{51,2050}{1 + 51,2050 \cdot 0,0042 \cdot (1 + 3,4747)} = 26,0939 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$$\varepsilon^{\text{par}} \quad - \text{ součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Velikost sálové plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = (C \cdot H + C \cdot B) \cdot x = (5,950 \cdot 6,008 + 5,950 \cdot 3,079) \cdot 0,9 = 48,6609 \text{ m}^2 \quad (6-107)$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{\text{ln}} = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{sy}} = 923,25 - 313,2 = 609,95 \text{ °C} \quad (6-108)$$

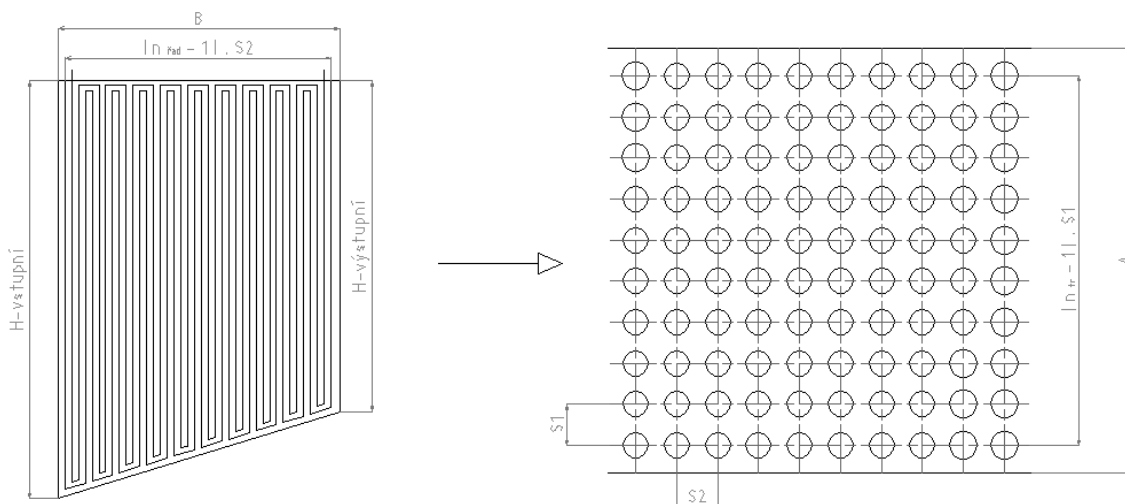
**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_b^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 48,6609 \cdot 26,0939 \cdot 609,95 = 774,5748 \text{ kW} \quad (6-109)$$

### 6.3 Přejhřívák SH4

Přejhřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou ve dvojhadu v souproutém zapojení. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

#### 6.3.1 Návrh geometrie



Obrázek 10: Geometrie přehříváku SH4

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0268 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 170 \text{ mm} = 0,17 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Vstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{vst} = 5960 \text{ mm} = 5,960 \text{ m}$$

Výstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{výst} = 5200 \text{ mm} = 5,200 \text{ m}$$

Střední výška spalínového kanálu:

$$H_{stř} = \frac{H_{vst} + H_{výst}}{2} = \frac{5960 + 5200}{2} = 5,580 \text{ m} \quad (6-110)$$

Šířka spalínového kanálu:

$$A = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

Délka spalínového kanálu:

$$B = 1700 \text{ mm} = 1,700 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 38: Parametry média přehříváku SH4

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	461,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	520	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,03227	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03673	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 39: Parametry spalin přehříváku SH4 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	836,5	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	754,6	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,03227 + 0,03673}{2} = 0,0345 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-111)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{461,6 + 520}{2} = 490,8 \text{ °C} \quad (6-112)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{836,5 + 754,6}{2} = 795,55 \text{ °C} \quad (6-113)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{490,8 + 795,55}{2} = 643,175 \text{ °C} \quad (6-114)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 22,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot 55,5556 \cdot 0,0345}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 22,5} = 151,01 \Rightarrow \text{zvoleno 152 trubek} \quad (6-115)$$

- jelikož jsou trubky zapojené v dvojhadu volím počet trubek v řadě  $n_{tr}^{řad} = 76$  trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot 55,5556 \cdot 0,0345}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 152} = 22,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-116)$$

**Vstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{řad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 13,020 \cdot 5,96 - (76 \cdot 5,96 \cdot 0,038) = 60,3867 \text{ m}^2 \quad (6-117)$$

**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 13,020 \cdot 5,2 - (76 \cdot 5,2 \cdot 0,038) = 52,6864 \text{ m}^2 \quad (6-118)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (60,3867 \cdot 52,6864)}{60,3867 + 52,6864} = 56,2744 \text{ m}^2 \quad (6-119)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{b}}}{p_{\text{b}} - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (6-120)$$

$$V_{\text{sp}} = 8,5711 \cdot \frac{795,55 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,25} \cdot 7,3636$$

$$V_{\text{sp}} = 247,5450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_{\text{b}}$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{247,5450}{56,2744} = 4,40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-121)$$

**6.3.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (6-122)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 40: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH4 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_{\text{s}}$	0,0902	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_{\text{s}}$	$1,311 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$\text{Pr}_{\text{s}}$	0,6	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-123)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,5141 \cdot \frac{0,0902}{0,038} \cdot \left( \frac{4,40 \cdot 0,038}{1,311 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6^{0,33} = 63,3956 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 4,4737 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,6316}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,5141 \quad (6-124)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,4737 \quad (6-125) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316 \quad (6-126)$$

**6.3.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 41: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH4 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$76,5 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$283 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot v_{stř}$	$9,764 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	0,966	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-127)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0799 \cdot \frac{76,5 \cdot 10^{-3}}{0,0268} \cdot \left( \frac{22,35 \cdot 0,0268}{9,764 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,966^{0,4}$$

$$\alpha_p = 2985,7794 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}} \right)^{0,5} = \left( \frac{795,55 + 273,15}{643,175 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0799 \quad (6-128)$$



**6.3.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (6-129)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1722 \cdot (795,55 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{667,5 + 273,15}{795,55 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{667,5 + 273,15}{795,55 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 35,9789 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosu na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH4**

$$S_{\text{SH4}} = 690 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosu na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH4}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (6-130)$$

$$t_z = 490,8 + \left(0,0141 + \frac{1}{2985,7794}\right) \cdot \frac{8444,4512}{690} \cdot 10^3 = 667,5 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$	– součinitel zanesení [1]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
---------------	---------------------------	---

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1\right) = 0,4784 \text{ m} \quad (6-131)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-132)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-133)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-134)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,4784}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{795,55 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 3,3709 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{sp \min} \quad (6-135)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-136)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(795,55 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,5783 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-137)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (3,3709 + 0,5783) \cdot 0,1 \cdot 0,4784 = 0,1889 \quad (6-138)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1889} = 0,1722 \quad (6-139)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 63,3956 + 35,9789 = 99,3745 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-140)$$

kde:

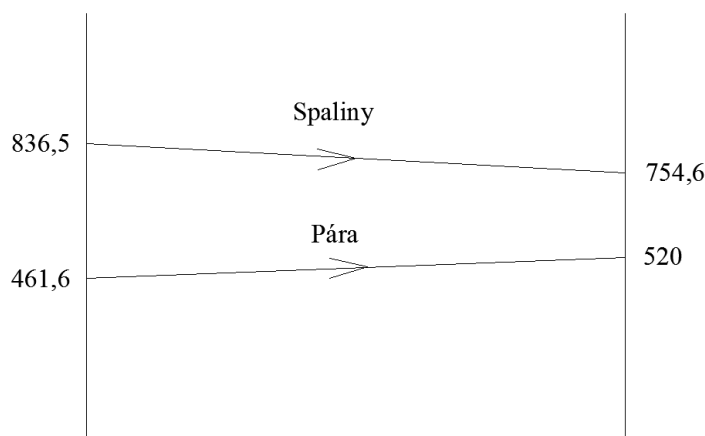
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_c} = \frac{99,3745}{1 + \left( 0,0141 + \frac{1}{2985,7794} \right) \cdot 99,3745} = 40,8199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-141)$$

### 6.3.5 Tepelný výkon přehříváku SH4

#### Střední teplotní spád



Obrázek 11: Teplotní spád SH4

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(754,6 - 520) - (836,5 - 461,6)}{\ln\left(\frac{754,6 - 520}{836,5 - 461,6}\right)} = 299,3 \text{ °C} \quad (6-142)$$

#### Plocha přehříváku SH4

$$S_{\text{SH4}} = \frac{Q_{\text{SH4}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{8444,4512}{40,8199 \cdot 299,3} = 691,1826 \text{ m}^2 \quad (6-143)$$

#### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 76 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,0268}{2} \cdot 5,58 = 43,1661 \text{ m}^2 \quad (6-144)$$

#### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH4}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{691,1826}{43,1661} = 16,0122 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (6-145)$$

#### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH4}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 16 \cdot 43,1661 = 690,6576 \text{ m}^2 \quad (6-146)$$

#### Délka přehříváku SH4

$$L_{\text{SH4}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,1 = 1,5 \text{ m} \quad (6-147)$$

#### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{SH4}} = S_{\text{SH4}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 690,6576 \cdot 40,8199 \cdot 299,3 = 8438,0374 \text{ kW} \quad (6-148)$$

#### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{SH4}} - Q_{\text{SH4}}}{Q_b^{\text{SH4}}} = \frac{8438,0374 - 8444,4512}{8438,0374} = -0,0761 \% \quad (6-149)$$

### 6.3.6 Výkonu paralelních ploch

#### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet řad:} \quad n_{\text{řad}}^{\text{par}} = 20$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

#### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot H_{\text{stř}} - n_{\text{řad}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}^2}}{4}}{2 \cdot (A + H_{\text{stř}}) + n_{\text{řad}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 13,020 \cdot 5,58 - 20 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (13,020 + 5,58) + 20 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 7,0885 \text{ m} \quad (6-150)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_s^{0,4} \quad (6-151)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,0902}{7,0885} \cdot \left( \frac{4,40 \cdot 7,0885}{1,311 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,6^{0,4} = 4,7727 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 35,9789 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-152)$$

#### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (6-153)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 4,7727 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 35,9789 \right) = 34,7672 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

#### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}}} = \frac{34,7672}{1 + 34,7672 \cdot 0,004} = 30,5225 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-154)$$

kde:

$\varepsilon^{\text{par}}$  – součinitel zanesení [1] [m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>]

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{SAL}^{par} = S^{par} \cdot x^{par} = [L_{SH4} \cdot (A + 2 \cdot H_{stř}) + A \cdot (n_{řad} - 1) \cdot s_2 \cdot \cos \alpha] \cdot x^{par} \quad (6-155)$$

$$S_{SAL}^{par} = [1,75 \cdot (13,020 + 2 \cdot 5,58) + 13,020 \cdot (16 - 1) \cdot 0,1 \cdot \cos 37] \cdot 0,9 = 52,1211 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{ln} = t_{stř}^{sp} - t^{syt} = 795,55 - 313,2 = 482,35 \text{ °C} \quad (6-156)$$

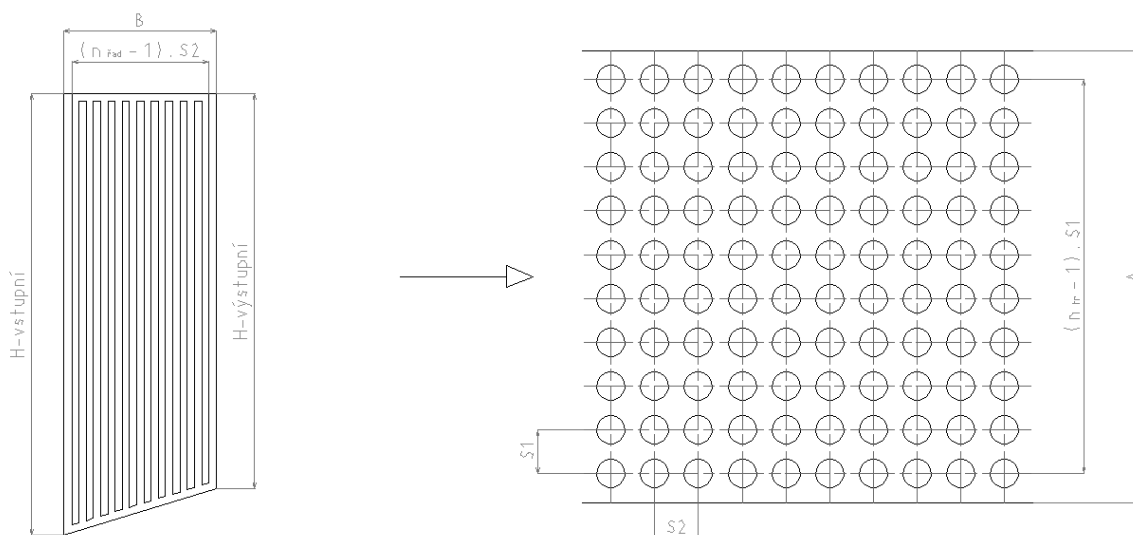
**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_b^{par} = S_{SAL}^{par} \cdot k^{par} \cdot \Delta t_{ln} = 52,1211 \cdot 30,5225 \cdot 482,35 = 867,3543 \text{ kW} \quad (6-157)$$

## 6.4 Přeřívák SH2

Přeřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami a spalínovou mříží.

### 6.4.1 Návrh geometrie



Obrázek 12: Geometrie přeříváku SH2

#### Návrh geometrie přeříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,005 = 0,028 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Vstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{vst}} = 4830 \text{ mm} = 4,83 \text{ m}$$

Výstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{výst}} = 4400 \text{ mm} = 4,40 \text{ m}$$

Střední výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{stř}} = \frac{H_{\text{vst}} + H_{\text{výst}}}{2} = \frac{4830 + 4400}{2} = 4.615 \text{ m} \quad (6-158)$$

Šířka spalínového kanálu:

$$A = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

Délka spalínového kanálu:

$$B = 1010 \text{ mm} = 1,010 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 42: Parametry média přehříváku SH2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	404,4	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	468,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02784	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03254	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 43: Parametry spalin přehříváku SH2 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	754,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	667,3	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02784 + 0,0324}{2} = 0,03019 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-159)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{404,4 + 468,2}{2} = 436,3 \text{ °C} \quad (6-160)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{754,6 + 667,3}{2} = 710,95 \text{ °C} \quad (6-161)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{436,3 + 710,95}{2} = 573,625 \text{ °C} \quad (6-162)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 16,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{rad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,03019}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 16,5} = 151,86 \quad (6-163)$$

=> zvoleno 152 trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{rad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,03019}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 152} = 16,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-164)$$

**Vstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{rad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 13,020 \cdot 4,83 - (152 \cdot 4,83 \cdot 0,038) = 34,9885 \text{ m}^2 \quad (6-165)$$

**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 13,020 \cdot 4,40 - (152 \cdot 4,40 \cdot 0,038) = 31,8736 \text{ m}^2 \quad (6-166)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (34,9885 \cdot 31,8736)}{34,9885 + 31,8736} = 33,3585 \text{ m}^2 \quad (6-167)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (6-168)$$

$$V_{\text{sp}} = 8,5711 \cdot \frac{710,95 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,25} \cdot 7,3636$$

$$V_{\text{sp}} = 227,9490 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{227,9490}{33,3585} = 6,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-169)$$

**6.4.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (6-170)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 44: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0829	W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	1,14 · 10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,6089	[-]



**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-171)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0997 \cdot \frac{0,0829}{0,038} \cdot \left( \frac{6,83 \cdot 0,038}{1,14 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6089^{0,33} = 61,9755 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,6316}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,0997 \quad (6-172)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (6-173) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316 \quad (6-174)$$

**6.4.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 45: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$70,65 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$258,31 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$7,798 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,023	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-175)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0780 \cdot \frac{70,65 \cdot 10^{-3}}{0,028} \cdot \left( \frac{16,48 \cdot 0,028}{7,798 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,023^{0,4}$$

$$\alpha_p = 2619,6270 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{710,951 + 273,15}{573,625 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0780 \quad (6-176)$$

**6.4.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (6-177)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1223 \cdot (710,95 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{561,5 + 273,15}{710,95 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{561,5 + 273,15}{710,95 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosu na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH2**

$$S_{\text{SH2}} = 727 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosu na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH2}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (6-178)$$

$$t_z = 436,3 + \left(0,0099 + \frac{1}{2619,6270}\right) \cdot \frac{8851,6080}{727} \cdot 10^3 = 561,5 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$	– součinitel zanesení [1]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
---------------	---------------------------	---

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1\right) = 0,2221 \text{ m} \quad (6-179)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-180)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-181)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-182)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,2221}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{710,95 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,2636 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{sp \text{ min}} \quad (6-183)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-184)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(710,95 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,6110 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-185)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (5,2636 + 0,6110) \cdot 0,1 \cdot 0,2221 = 0,1305 \quad (6-186)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1305} = 0,1223 \quad (6-187)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 61,9755 + 19 = 80,9755 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-188)$$

kde:

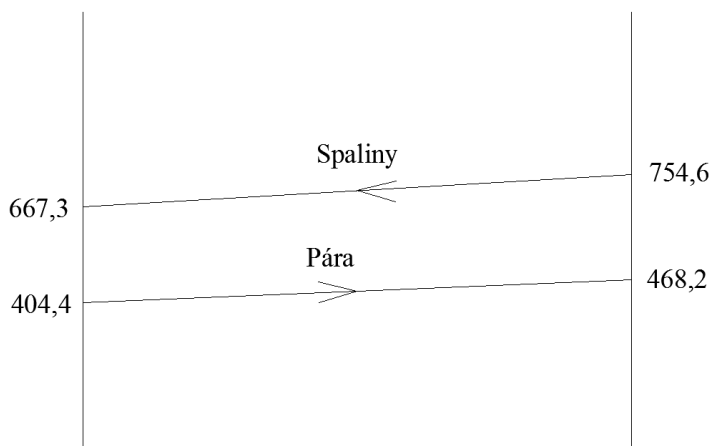
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_s} = \frac{80,9755}{1 + \left( 0,0099 + \frac{1}{2619,6270} \right) \cdot 80,9755} = 44,1869 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-189)$$

## 6.4.5 Tepelný výkon přehříváku SH2

### Střední teplotní spád



Obrázek 13: Teplotní spád SH2

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(667,3 - 404,4) - (754,6 - 468,2)}{\ln\left(\frac{667,3 - 404,4}{754,6 - 468,2}\right)} = 274,5 \text{ °C} \quad (6-190)$$

### Plocha přehříváku SH2

$$S_{\text{SH2}} = \frac{Q_{\text{SH2}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{8851,6080}{44,1869 \cdot 274,5} = 729,7705 \text{ m}^2 \quad (6-191)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 152 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,028}{2} \cdot 4,615 = 72,7242 \text{ m}^2 \quad (6-192)$$

### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH2}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{729,7705}{72,7242} = 10,0347 \Rightarrow 10 \text{ řad} \quad (6-193)$$

### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH2}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 10 \cdot 72,7242 = 727,2420 \text{ m}^2 \quad (6-194)$$

### Tepelný výkon

$$Q_{\text{b}}^{\text{SH2}} = S_{\text{SH2}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 727,2420 \cdot 44,1869 \cdot 274,5 = 8820,9393 \text{ kW} \quad (6-195)$$

### Kontrola

$$\frac{Q_{\text{b}}^{\text{SH2}} - Q_{\text{SH2}}}{Q_{\text{b}}^{\text{SH2}}} = \frac{8820,9393 - 8851,6080}{8826,7141} = -0,348 \% \quad (6-196)$$

## 6.4.6 Výpočet výkonu paralelních ploch

### 6.4.6.1 Výpočet výkonu paralelních ploch výparnickových trubek

#### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet řad:} \quad n_{\text{řad}}^{\text{par}} = 11$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

#### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot H_{\text{stř}} - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}2}}{4}}{2 \cdot (A + H_{\text{stř}}) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 13,020 \cdot 4,615 - 11 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (13,020 + 4,615) + 11 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 6,4336 \text{ m} \quad (6-197)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (6-198)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,0829}{6,4336} \cdot \left( \frac{6,83 \cdot 6,4336}{1,14 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,6089^{0,4} = 7,1519 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-199)$$

#### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (6-200)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 7,1519 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 19 \right) = 23,1198 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [-]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [-]

#### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}}} = \frac{23,1198}{1 + 23,1198 \cdot 0,004} = 21,1627 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-201)$$

kde:

$\varepsilon^{\text{par}}$  – součinitel zanesení [1] [m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>]

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = S^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}} = [L_{\text{SH4}} \cdot (A + 2 \cdot H_{\text{stř}}) + A \cdot (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 \cdot \cos \alpha] \cdot x^{\text{par}} \quad (6-202)$$

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = [1,05 \cdot (13,020 + 2 \cdot 4,615) + 13,020 \cdot (10 - 1) \cdot 0,1 \cdot \cos 37] \cdot 0,9 = 29,4488 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{syt}} = 710,95 - 313,2 = 397,75 \text{ °C} \quad (6-203)$$

**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_{\text{b}}^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 29,4488 \cdot 21,1627 \cdot 397,75 = 247,8842 \text{ kW} \quad (6-204)$$

**6.4.6.2 Výpočet paralelní plochy mříže****Návrh geometrie mříže**

Vnější průměr trubky:	$D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d^{\text{par}} = D^{\text{par}} - 2 \cdot s = 0,0603 - 2 \cdot 0,005 = 0,0503 \text{ m}$
Rozteč na šířku:	$s_1^{\text{mř}} = 170 \text{ mm} = 0,17 \text{ m}$
Rozteč na délku:	$s_2^{\text{mř}} = 75 \text{ mm} = 0,075 \text{ m}$
Šířka mříže:	$B = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_{\text{tr}}^{\text{mř}} = 76$
Počet řad:	$n_{\text{řad}}^{\text{mř}} = 2$

**Parametry spalin**

Tabulka 46: Parametry spalin mříže

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{\text{in}}^{\text{sp}}$	667,3	°C	Teplota na výstupu	$t_{\text{out}}^{\text{sp}}$	654,7	°C

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{\text{str}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{667,3 + 654,7}{2} = 661 \text{ °C} \quad (6-205)$$

**Výška rozvolnění mříže**

- uvažují rychlost spalin  $w_{\text{sp}}^{\text{mř}} = 7,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$H^{\text{mř}} = \frac{V_{\text{sp}}}{w_{\text{sp}}^{\text{mř}} \cdot (B - n_{\text{tr}}^{\text{mř}} \cdot D^{\text{par}})} = \frac{227,9490}{7,45 \cdot (13,020 - 76 \cdot 0,0603)} = 3,627 \text{ m} \quad (6-206)$$

=> zvoleno  $H^{\text{mř}} = 3,650 \text{ m}$

**Průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{sp}}^{\text{mř}} = B \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{mř}} \cdot H^{\text{mř}} \cdot D^{\text{par}}) = 13,020 \cdot 4,4 - (76 \cdot 3,650 \cdot 0,0603) = 40,5608 \text{ m}^2 \quad (6-207)$$

**Skutečná rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{sp}}^{\text{mř}}} = \frac{227,9490}{40,5608} = 5,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-208)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí – příčné obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou**

Tabulka 47: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v mříži pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0787	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,048 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,613	[–]

$$\alpha_k^{mř} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D^{par}} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D^{par}}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-209)$$

$$\alpha_k^{mř} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 0,7659 \cdot \frac{0,0787}{0,0603} \cdot \left( \frac{5,62 \cdot 0,0603}{1,048 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,613^{0,33} = 29,5844 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**Korekční součinitel na počet řad**

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{řad}^{mř} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (2 - 2) = 0,91 \quad (6-210)$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,8192 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,2438}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,7659 \quad (6-211)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1^{mř}}{D} = \frac{0,17}{0,0603} = 2,8192 \quad (6-212)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2^{mř}}{D} = \frac{0,075}{0,0603} = 1,2438 \quad (6-213)$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6-214)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,68 + 1}{2} \cdot 0,1050 \cdot (661 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{393,2 + 273,15}{661 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{393,2 + 273,15}{661 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 10,5921 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosu na straně spalin	[K]



**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (5,8989 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,1880 = 0,1109 \quad (6-215)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1109} = 0,1050 \quad (6-216)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-217)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,1880}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{661 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,02024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,8989 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D^{par} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^{par2}} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,075}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,1880 \text{ m} \quad (6-218)$$

**Teplota povrchu trubek mříže**

$$t_z = t^{synt} + \Delta t = 313,2 + 80 = 393,2 \text{ °C} \quad (6-219)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k^{mř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 29,5844 + 10,5921 = 40,1765 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-220)$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon_z \cdot \alpha_c} = \frac{40,1765}{1 + 0,004 \cdot 40,1765} = 34,6139 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-221)$$

**Plocha mříže**

$$S^{mř} = \pi \cdot D^{par} \cdot H \cdot n_{tr}^{mř} \cdot n_{rad}^{mř} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 3,65 \cdot 76 \cdot 2 = 105,1002 \text{ m}^2 \quad (6-222)$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t = t_{stř}^{sp} - t^{synt} = 661 - 313,2 = 347,8 \text{ °C} \quad (6-223)$$

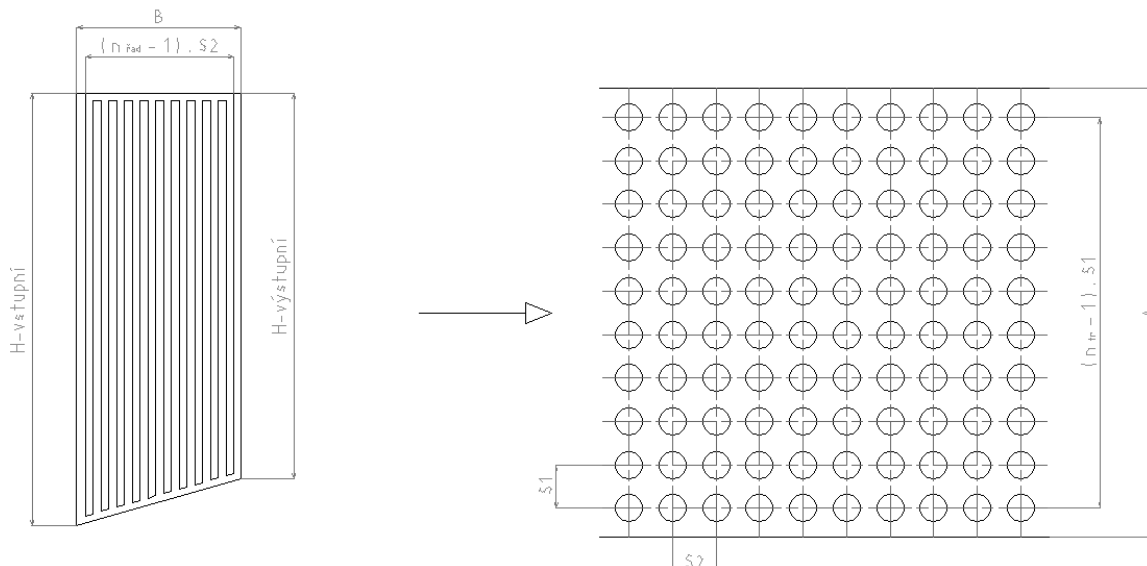
**Tepelný výkon mříže**

$$Q_b^{mř} = S^{mř} \cdot k \cdot \Delta t_{ln} = 105,1002 \cdot 34,6139 \cdot 347,8 = 1265,2694 \text{ kW} \quad (6-224)$$

## 6.5 Přeřívák SH1B

Přeřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 6.5.1 Návrh geometrie



Obrázek 14: Geometrie přeříváku SH1B

#### Návrh geometrie přeříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 4,5 \text{ mm} = 0,0045 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0045 = 0,029 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 90 \text{ mm} = 0,09 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Vstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{vst}} = 3810 \text{ mm} = 3,810 \text{ m}$$

Výstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{výst}} = 3720 \text{ mm} = 3,720 \text{ m}$$

Střední výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{stř}} = \frac{H_{\text{vst}} + H_{\text{výst}}}{2} = \frac{3810 + 3720}{2} = 3,765 \text{ m} \quad (6-225)$$

Šířka spalínového kanálu:

$$A = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

## Parametry média

Tabulka 48: Parametry média přehříváku SH1B

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	371,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	404,4	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02467	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,02785	$m^3 \cdot kg^{-1}$

## Parametry spalin

Tabulka 49: Parametry spalin přehříváku SH1B pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	654,7	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	598,2	°C

## Střední hodnoty

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02467 + 0,02785}{2} = 0,02626 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-226)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{371,2 + 404,4}{2} = 387,8 \text{ °C} \quad (6-227)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{654,7 + 598,2}{2} = 626,45 \text{ °C} \quad (6-228)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{387,8 + 626,45}{2} = 507,125 \text{ °C} \quad (6-229)$$

## Počet trubek v řadě

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02626}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 22} = 92,35 \quad (6-230)$$

=> zvoleno 93 trubek

## Korigovaná rychlost páry

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02626}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 21,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-231)$$

## Vstupní průtočný průřez spalin

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{řad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 8 \cdot 3,810 - (93 \cdot 3,810 \cdot 0,038) = 17,0155 \text{ m}^2 \quad (6-232)$$

**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 8 \cdot 3,720 - (93 \cdot 3,720 \cdot 0,038) = 16,6135 \text{ m}^2 \quad (6-233)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (17,0155 \cdot 16,6135)}{17,0155 + 16,6135} = 16,8121 \text{ m}^2 \quad (6-234)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (6-235)$$

$$V_{\text{sp}} = 8,5711 \cdot \frac{626,45 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,35} \cdot 7,3636$$

$$V_{\text{sp}} = 208,5824 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{208,5824}{16,8121} = 12,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-236)$$

**6.5.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (6-237)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 50: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1B pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0757	W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,9846 \cdot 10^{-4}$	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,617	[-]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (6-238)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0187 \cdot \frac{0,0757}{0,038} \cdot \left( \frac{12,41 \cdot 0,038}{0,9846 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,617^{0,33} = 85,3837 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,3684}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,0187 \quad (6-239)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (6-240)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,3684 \quad (6-241)$$

**6.5.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 51: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1B pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$67,82 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$236,39 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$6,207 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,167	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-242)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0737 \cdot \frac{67,82 \cdot 10^{-3}}{0,029} \cdot \left( \frac{21,84 \cdot 0,029}{6,207 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,167^{0,4}$$

$$\alpha_p = 3939,2544 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{626,45 + 273,15}{507,125 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0737 \quad (6-243)$$

**6.5.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (6-244)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1204 \cdot (626,45 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{471,6 + 273,15}{626,45 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{471,6 + 273,15}{626,45 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 13,8526 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH1B**

$$S_{\text{SH1B}} = 369 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH1B}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (6-245)$$

$$t_z = 387,8 + \left(0,0052 + \frac{1}{3939,2544}\right) \cdot \frac{5672,7216}{369} \cdot 10^3 = 471,6 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$	– součinitel zanesení [1]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
---------------	---------------------------	---

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1\right) = 0,1965 \text{ m} \quad (6-246)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-247)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-248)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-249)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,1965}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{626,45 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,8798 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{sp \text{ min}} \quad (6-250)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-251)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(626,45 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,6487 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-252)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (5,8798 + 0,6487) \cdot 0,1 \cdot 0,1965 = 0,1283 \quad (6-253)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1283} = 0,1204 \quad (6-254)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 85,3837 + 13,8526 = 99,2363 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-255)$$

kde:

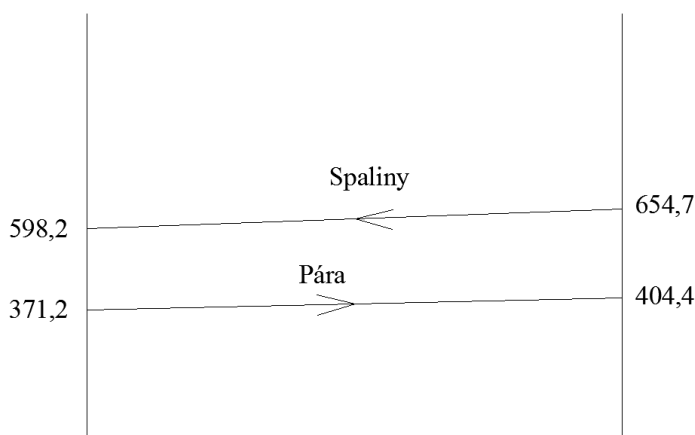
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_c} = \frac{99,2363}{1 + \left( 0,0052 + \frac{1}{3939,2544} \right) \cdot 99,2363} = 64,3881 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-256)$$

## 6.5.5 Tepelný výkon přehříváku SH1B

### Střední teplotní spád



Obrázek 15: Teplotní spád SH1B

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(598,2 - 371,2) - (654,7 - 404,4)}{\ln\left(\frac{598,2 - 371,2}{654,7 - 404,4}\right)} = 238,5 \text{ °C} \quad (6-257)$$

### Plocha přehříváku SH1B

$$S_{\text{SH1B}} = \frac{Q_{\text{SH1B}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{5672,7216}{64,3881 \cdot 238,5} = 369,4005 \text{ m}^2 \quad (6-258)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 93 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,029}{2} \cdot 3,765 = 36,8504 \text{ m}^2 \quad (6-259)$$

### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH1B}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{369,4005}{36,8504} = 10,0243 \Rightarrow 10 \text{ řad} \quad (6-260)$$

### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH1B}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 10 \cdot 36,8504 = 368,5040 \text{ m}^2 \quad (6-261)$$

### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{SH1B}} = S_{\text{SH1B}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 368,5040 \cdot 64,3881 \cdot 238,5 = 5658,9545 \text{ kW} \quad (6-262)$$

### Kontrola

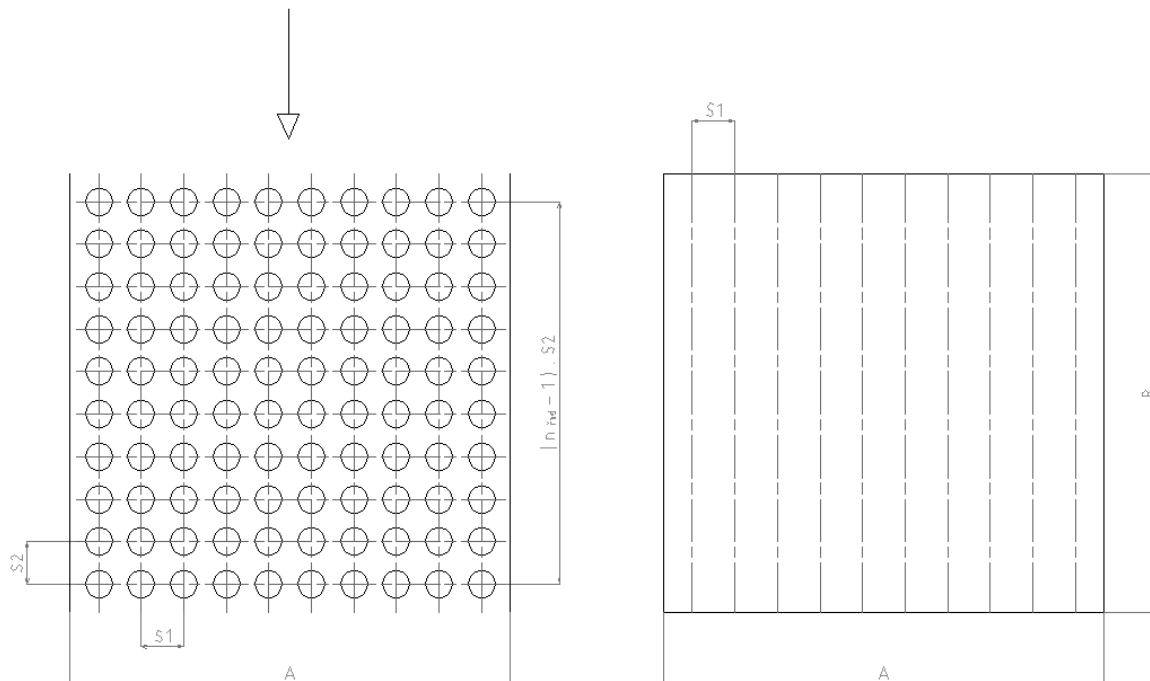
$$\frac{Q_b^{\text{SH1B}} - Q_{\text{SH1B}}}{Q_b^{\text{SH1B}}} = \frac{5658,9545 - 5672,7216}{5658,9545} = -0,243 \% \quad (6-263)$$



## 6.6 Přejhřívák SH1A

Přejhřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 6.6.1 Návrh geometrie



Obrázek 16: Geometrie přehříváku SH1A

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 4,5 \text{ mm} = 0,0045 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0045 = 0,029 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

#### Geometrie spalinového kanálu

Délka spalinového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalinového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 52: Parametry média přehříváku SH1A

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	313,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	371,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,01739	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,02467	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 53: Parametry spalin přehříváku SH1A pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	598,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	447,3	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,01739 + 0,02467}{2} = 0,02103 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-264)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{313,2 + 371,2}{2} = 342,2 \text{ °C} \quad (6-265)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{598,2 + 447,3}{2} = 522,75 \text{ °C} \quad (6-266)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{342,2 + 522,75}{2} = 432,475 \text{ °C} \quad (6-267)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 17,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02103}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 17,6} = 92,45 \quad (6-268)$$

=> zvoleno 93 trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02103}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 17,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-269)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{řad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (93 \cdot 3,650 \cdot 0,038) = 16,3009 \text{ m}^2 \quad (6-270)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-271)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{522,75 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,45} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 184,7214 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_b$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{sp}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{184,7214}{16,3009} = 11,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-272)$$

**6.6.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-273)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 54: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1A pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,067	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,8024 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,627	$[-]$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6-274)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0004 \cdot \frac{0,067}{0,038} \cdot \left( \frac{11,13 \cdot 0,038}{0,8024 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,627^{0,33} = 79,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele na straně spalín

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,1053}{2}\right)^3\right]^2} = 1,0004 \quad (6-275)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (6-276) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,038} = 2,1053 \quad (6-277)$$

### 6.6.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry

Tabulka 55: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1A pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$68,8 \cdot 10^{-3}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$216 \cdot 10^{-7}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$4,545 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,384	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-278)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0620 \cdot \frac{68,8 \cdot 10^{-3}}{0,029} \cdot \left(\frac{17,49 \cdot 0,029}{4,545 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,384^{0,4} = 4545,9051 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left(\frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}}\right)^{0,5} = \left(\frac{522,75 + 273,15}{432,475 + 273,15}\right)^{0,5} = 1,0620 \quad (6-279)$$

### 6.6.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6-280)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1185 \cdot (522,75 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{403 + 273,15}{522,75 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{403 + 273,15}{522,75 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 9,7597 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH1A**

$$S_{SH1A} = 1428 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH1A}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (6-281)$$

$$t_z = 342,2 + \left( 0,0057 + \frac{1}{4545,9051} \right) \cdot \frac{14662,9632}{1428} \cdot 10^3 = 403 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,08}{0,038^2} - 1 \right) = 0,1709 \text{ m} \quad (6-282)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-283)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-284)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-285)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,1709}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{522,75 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 6,6776 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{sp \min} \quad (6-286)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalínách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-287)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(522,75 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,7039 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-288)$$

**Optická hustota spalín**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (6,6776 + 0,7039) \cdot 0,1 \cdot 0,1709 = 0,1261 \quad (6-289)$$

**Stupeň černosti spalín**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1261} = 0,1185 \quad (6-290)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín**

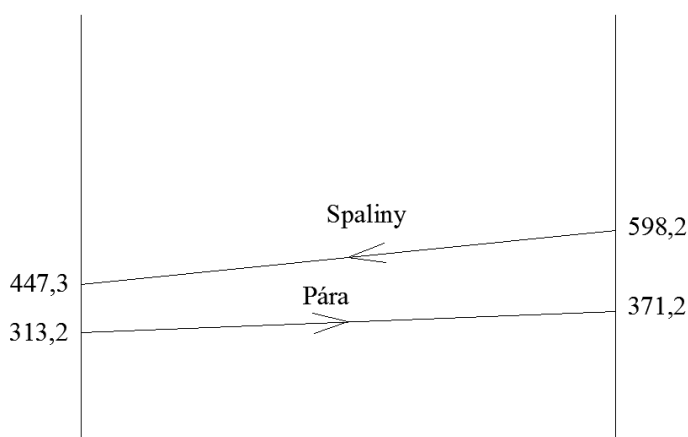
$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 79,4 + 9,7597 = 89,1597 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-291)$$

kde:

$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left(\varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_c} = \frac{89,1597}{1 + \left(0,0057 + \frac{1}{4545,9051}\right) \cdot 89,1597} = 58,3573 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-292)$$

**6.6.5 Tepelný výkon přehříváku SH1A****Střední teplotní spád**

Obrázek 17: Teplotní spád SH1A

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(447,3 - 313,2) - (598,2 - 371,2)}{\ln\left(\frac{447,3 - 313,2}{598,2 - 371,2}\right)} = 176,5 \text{ °C} \quad (6-293)$$

**Plocha přehříváku SH1A**

$$S_{\text{SH1A}} = \frac{Q_{\text{SH1A}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{14662,9632}{58,3573 \cdot 176,5} = 1423,5799 \text{ m}^2 \quad (6-294)$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 93 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,029}{2} \cdot 3,65 = 35,7249 \text{ m}^2 \quad (6-295)$$

**Počet řad**

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH1A}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{1423,5799}{35,7249} = 39,8484 \Rightarrow 40 \text{ řad} \quad (6-296)$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{\text{SH1A}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 40 \cdot 35,7249 = 1428,9960 \text{ m}^2 \quad (6-297)$$

**Výška SH1A**

$$H_{\text{SH1A}} = n_{\text{řad}} \cdot s_2 = 40 \cdot 0,08 = 3,2 \text{ m} \quad (6-298)$$

**Počet částí**

- pro maximální výšku přehříváku  $H_{\text{max}} = 1,65 \text{ m}$

$$n_{\text{část}} = \frac{H_{\text{SH1A}}}{H_{\text{max}}} = \frac{3,2}{1,65} = 1,9393 \Rightarrow 2 \text{ části} \quad (6-299)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_b^{\text{SH1A}} = S_{\text{SH1A}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 1428,9960 \cdot 58,3573 \cdot 176,5 = 14718,7495 \text{ kW} \quad (6-300)$$

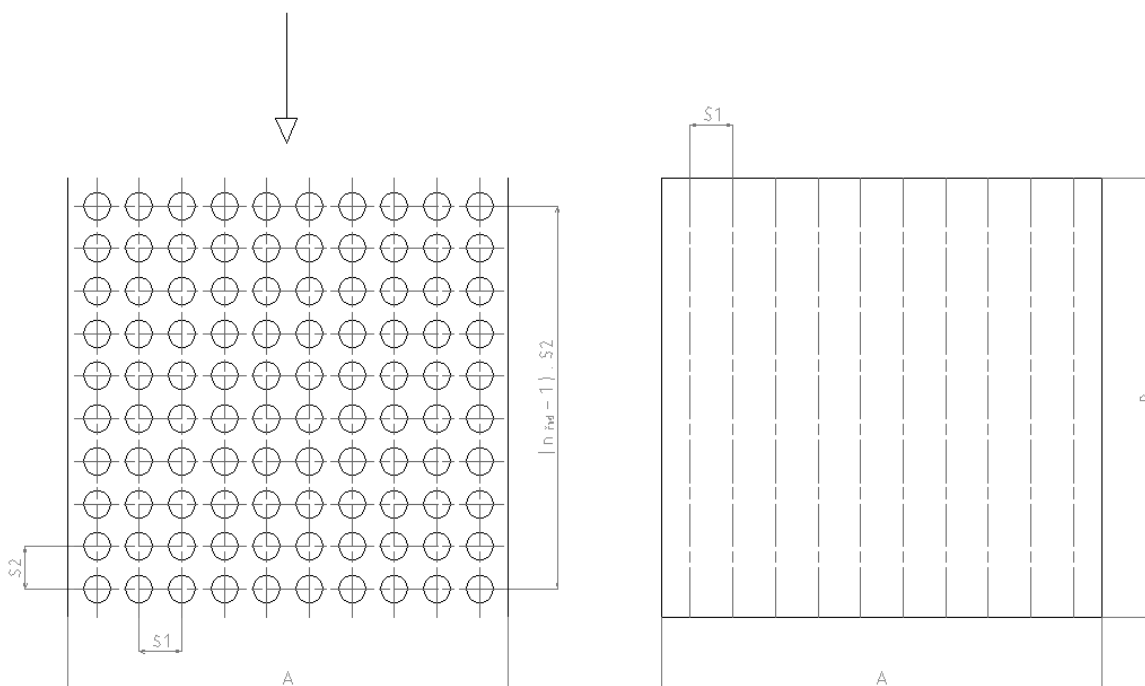
**Kontrola**

$$\frac{Q_b^{\text{SH1A}} - Q_{\text{SH1A}}}{Q_b^{\text{SH1A}}} = \frac{14718,7495 - 14662,9632}{14668,4080} = 0,379 \% \quad (6-301)$$

## 6.7 Ekonomizér EKO3

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 6.7.1 Návrh geometrie



Obrázek 18: Geometrie ekonomizéru 3

### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:

$$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$



**Parametry média**

Tabulka 56: Parametry média ekonomizéru 3

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	169	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	200	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00111	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00115	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 57: Parametry spalin ekonomizéru 3 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	447,3	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	373,2	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00111 + 0,00115}{2} = 0,00113 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-302)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{169 + 200}{2} = 184,5 \text{ °C} \quad (6-303)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{447,3 + 373,2}{2} = 410,25 \text{ °C} \quad (6-304)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{184,5 + 410,25}{2} = 297,375 \text{ °C} \quad (6-305)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 1,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (6-306)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00113}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 1,23} = 98,25 \Rightarrow \text{zvoleno 99 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (6-307)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00113}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 99} = 1,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{rad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (99 \cdot 3,650 \cdot 0,032) = 17,6368 \text{ m}^2 \quad (6-308)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-309)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{410,25 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,7} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 159,0052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_b$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{sp}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{159,0052}{17,6368} = 9,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-310)$$

**6.7.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-311)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 58: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO3 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0574	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,620 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,639	$[-]$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6-312)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0656 \cdot \frac{0,0574}{0,032} \cdot \left( \frac{9,02 \cdot 0,032}{6,2 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,639^{0,33} = 79,8691 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele na straně spalín

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2}\right)^3\right]^2} = 1,0656 \quad (6-313)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (6-314) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (6-315)$$

### 6.7.3 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (6-316)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1361 \cdot (410,25 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{265,3 + 273,15}{410,25 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{265,3 + 273,15}{410,25 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 6,4576 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalín při teplotě spalín	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalín	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalín	[K]

### Odhadnutá plocha EKO3

$$S_{\text{EKO3}} = 565 \text{ m}^2$$

### Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{voda}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{EKO3}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (6-317)$$

$$t_z = 184,5 + 0,0065 \cdot \frac{7019,9822}{565} \cdot 10^3 = 265,3 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1\right) = 0,2004 \text{ m} \quad (6-318)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1351 + 0,0673 = 0,2024 \quad (6-319)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2024 = 0,02024 \text{ MPa} \quad (6-320)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (6-321)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,0673}{3,16 \cdot \sqrt{0,02024 \cdot 0,2004}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{410,25 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2024$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 6,5188 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{sp \text{ min}} \quad (6-322)$$

$$G_s = 1 - 0,15 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 6,1052 = 11,6141 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,15 \cdot (0,21 + 1)]}{2 \cdot 11,6141} = 0,007814 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-323)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,007814}{\sqrt[3]{(410,25 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,7791 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (6-324)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (6,5188 + 0,7791) \cdot 0,1 \cdot 0,2004 = 0,1462 \quad (6-325)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1462} = 0,1361 \quad (6-326)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

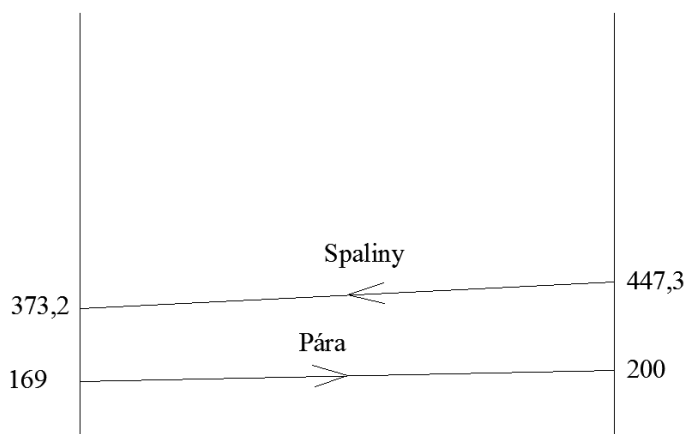
$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 79,8691 + 6,4576 = 86,3267 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-327)$$

kde:

$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon_z \cdot \alpha_s} = \frac{86,3267}{1 + 0,0065 \cdot 86,3267} = 55,2978 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-328)$$

**6.7.4 Tepelný výkon přehříváku EKO3****Střední teplotní spád**

Obrázek 19: Teplotní spád EKO3

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}}}\right)} = \frac{(373,2 - 169) - (447,3 - 200)}{\ln\left(\frac{373,2 - 169}{447,3 - 200}\right)} = 225,1 \text{ °C} \quad (6-329)$$

**Plocha přehříváku EKO3**

$$S_{\text{EKO3}} = \frac{Q_{\text{EKO3}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{7019,9822}{55,2978 \cdot 225,1} = 563,9657 \text{ m}^2 \quad (6-330)$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 99 \cdot \pi \cdot \frac{0,032 + 0,0248}{2} \cdot 8 = 70,6632 \text{ m}^2 \quad (6-331)$$

**Počet řad**

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO3}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{563,9657}{70,6632} = 7,9810 \Rightarrow 8 \text{ řad} \quad (6-332)$$

**Výška ekonomizéru**

$$H_{\text{EKO3}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (8 - 1) \cdot 0,08 = 0,56 \text{ m} \quad (6-333)$$

**Skutečná plocha ekonomizéru**

$$S_{\text{EKO3}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 8 \cdot 70,6632 = 565,3056 \text{ m}^2 \quad (6-334)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_b^{EKO3} = S_{EKO3}^{skut} \cdot k \cdot \Delta t_{ln} = 565,3056 \cdot 55,2978 \cdot 225,1 = 7036,6611 \text{ kW} \quad (6-335)$$

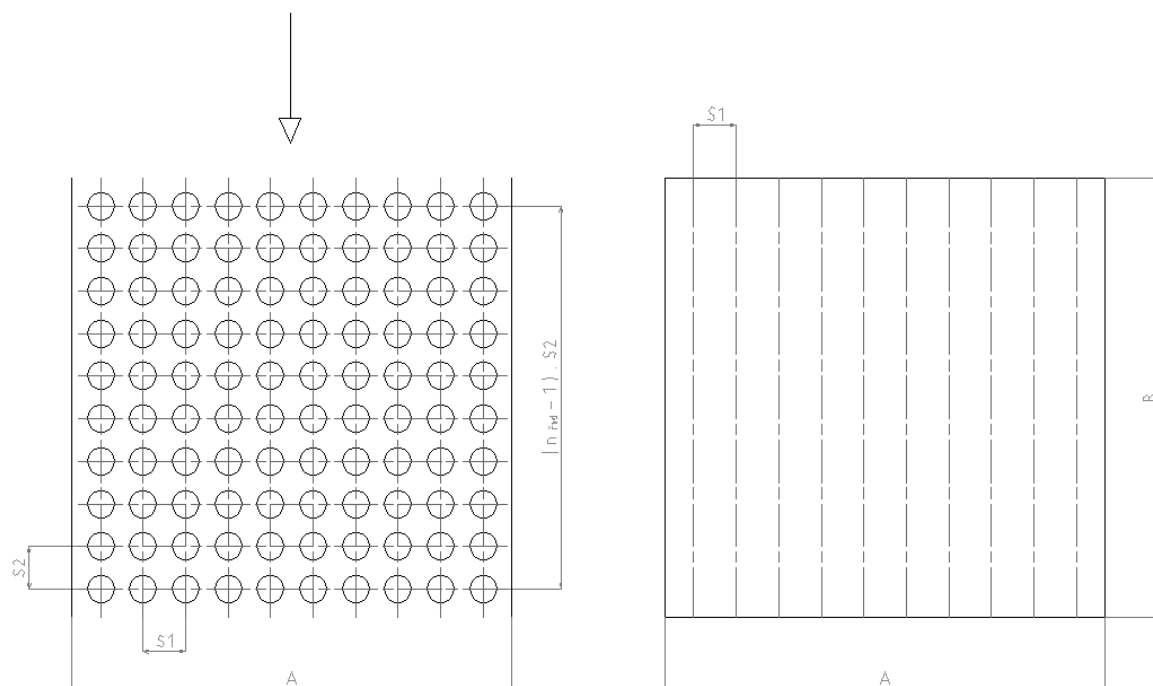
**Kontrola**

$$\frac{Q_b^{EKO3} - Q_{EKO3}}{Q_b^{EKO3}} = \frac{7036,6611 - 7019,9822}{7044,8688} = 0,237 \% \quad (6-336)$$

## 6.8 Ohřívák vzduchu AH2

Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 6.8.1 Návrh geometrie



Obrázek 20: Geometrie ohříváku vzduchu AH2

#### Návrh geometrie ohříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0025 = 0,0395 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 95 \text{ mm} = 0,095 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 68 \text{ mm} = 0,068 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 59: Parametry média ohříváku vzduchu AH2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{vzd}$	150	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{vzd}$	240	°C

**Parametry spalin**

Tabulka 60: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH2 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	373,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	301,1	°C

**Střední hodnoty**

Střední teplota média: 
$$t_{stř}^{vzd} = \frac{t_{in}^{vzd} + t_{out}^{vzd}}{2} = \frac{150 + 240}{2} = 195 \text{ °C} \quad (6-337)$$

Střední teplota spalin: 
$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{373,2 + 301,1}{2} = 337,15 \text{ °C} \quad (6-338)$$

Střední teplota stěny: 
$$t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{vzd} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{195 + 337,15}{2} = 266,075 \text{ °C} \quad (6-339)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-340)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{337,15 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,7} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 141,9972 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Skutečný průtok vzduchu v AH2**

$$V_{vzd} = O_{vz \min} \cdot \beta \cdot \frac{t_{stř}^{vzd} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b + \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-341)$$

$$V_{vzd} = 6,1052 \cdot 1,25 \cdot \frac{195 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 + 2,5} \cdot 7,3636$$

$$V_{vzd} = 93,9937 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$



**Počet paralelních trubek**

- zvolená rychlost vzduchu  $w_{vzd} = 13,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{vzd}} = \frac{4 \cdot 93,9937}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 13,5} = 5681,73 \Rightarrow \text{zvoleno } 5712 \text{ trubek} \quad (6-342)$$

**Korigovaná rychlost vzduchu**

$$w_{vzd} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot 93,9937}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 5712} = 13,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-343)$$

**Počet trubek jedné řady**

$$n_{tr}^{řad} = \frac{B}{s_1} = \frac{8}{0,095} = 84,21 \Rightarrow \text{zvoleno } 84 \text{ trubek} \quad (6-344)$$

**Počet řad**

$$n_{řad} = \frac{n_{tr}}{n_{tr}^{řad}} = \frac{5712}{84} = 68 \text{ řad} \quad (6-345)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{řad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (84 \cdot 3,650 \cdot 0,0445) = 15,5563 \text{ m}^2 \quad (6-346)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{141,9972}{15,5563} = 9,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-347)$$

**6.8.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-348)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 61: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0513	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,512 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,646	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6-349)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9675 \cdot \frac{0,0513}{0,0445} \cdot \left( \frac{9,13 \cdot 0,0445}{0,512 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,646^{0,33} = 66,0725 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,1348 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,5281}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,9675 \quad (6-350)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,1348 \quad (6-351) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,5281 \quad (6-352)$$

**6.8.3 Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu**

Tabulka 62: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{vzd}$	$38,6 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{vzd}$	$342 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_{vzd}$	0,69	[–]

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vzd} \cdot d}{u_{vzd}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-353)$$

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0638 \cdot \frac{38,6 \cdot 10^{-3}}{0,0395} \cdot \left( \frac{13,44 \cdot 0,0395}{342 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} = 46,4435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{337,15 + 273,15}{266,075 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0638 \quad (6-354)$$

### 6.8.4 Součinitel prostupu tepla

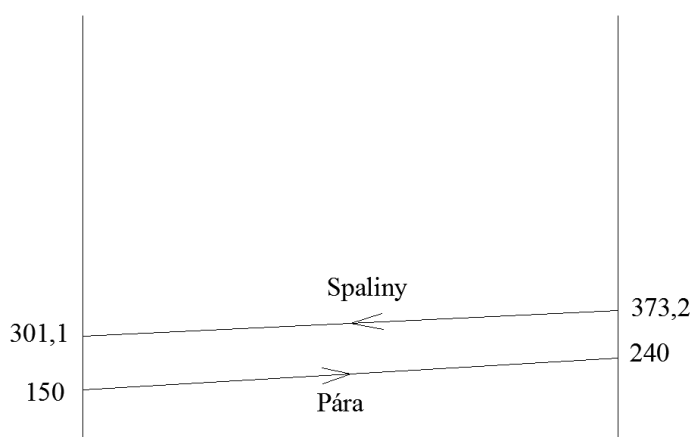
$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{k,př} \cdot \alpha_{vzd}}{\alpha_{k,př} + \alpha_{vzd}} = 0,72 \cdot \frac{66,0725 \cdot 46,4435}{66,0725 + 46,4435} = 19,6364 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-355)$$

kde:

$\xi$  – součinitel využití plochy [3] [-]

### 6.8.5 Tepelný výkon AH2

#### Střední teplotní spád



Obrázek 21: Teplotní spád AH2

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left( \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}})}{\ln \left( \frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}} \right)} = \frac{(301,1 - 150) - (373,2 - 240)}{\ln \left( \frac{301,1 - 150}{373,2 - 240} \right)} = 142 \text{ °C} \quad (6-356)$$

#### Rozdíly teplot

Menší rozdíl teplot  $\Delta t_m = t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{sp}} = 373,2 - 301,1 = 72,1 \text{ °C} \quad (6-357)$

Větší rozdíl teplot  $\Delta t_v = t_{\text{out}}^{\text{vzd}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}} = 240 - 150 = 90 \text{ °C} \quad (6-358)$

#### Parametry P a R

- dle těchto parametrů bude následně určen korekční součinitel

$$P = \frac{\Delta t_m}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}} = \frac{72,1}{373,2 - 150} = 0,32 \quad (6-359)$$

$$R = \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = \frac{90}{72,1} = 1,25 \quad (6-360)$$

**Korigovaný teplotní spád**

$$\Delta t_k = \Delta t_{ln} \cdot \psi = 142 \cdot 0,88 = 124,96 \text{ °C} \quad (6-361)$$

kde:

$$\psi \quad - \text{ korekční součinitel [1]} \quad [-]$$

**Plocha ohříváku AH2**

$$S_{AH2} = \frac{Q_{AH2}}{k \cdot \Delta t_k} = \frac{6719,0917}{19,6364 \cdot 124,96} = 2738,2789 \text{ m}^2 \quad (6-362)$$

**Plocha jedné části**

$$S_{část} = n_{tr} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 5712 \cdot \pi \cdot \frac{0,0445 + 0,0395}{2} \cdot 3,650 = 2750,9344 \text{ m}^2 \quad (6-363)$$

**Počet částí**

$$n_{část} = \frac{S_{AH2}}{S_{část}} = \frac{2738,2789}{2750,9344} = 0,9954 \Rightarrow 1 \text{ část} \quad (6-364)$$

**Skutečná plocha AH2**

$$S_{AH2}^{skut} = n_{část} \cdot S_{část} = 1 \cdot 2750,9344 = 2750,9344 \text{ m}^2 \quad (6-365)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_b^{AH2} = S_{AH2} \cdot k \cdot \Delta t_k = 2750,9344 \cdot 19,6364 \cdot 124,96 = 6750,1453 \text{ kW} \quad (6-366)$$

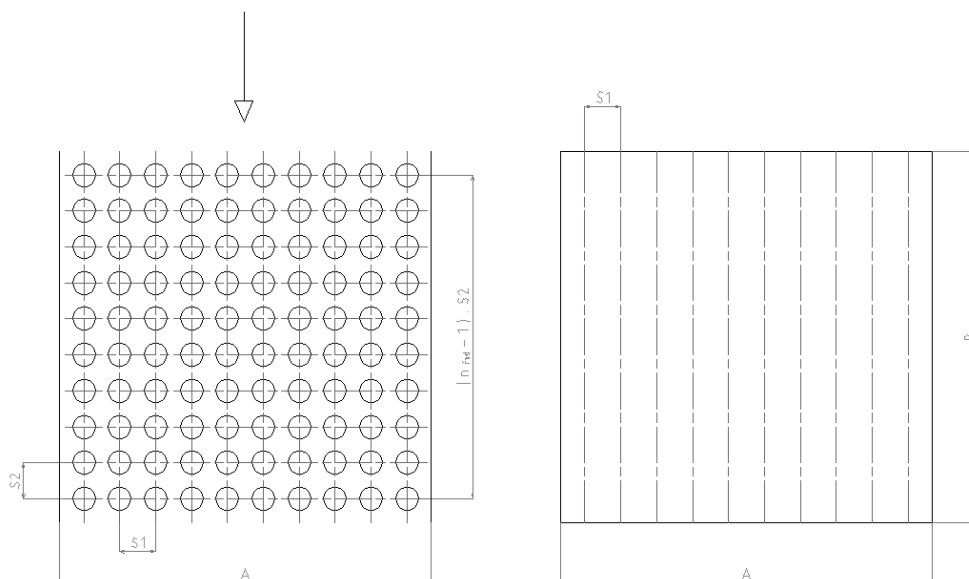
**Kontrola**

$$\frac{Q_b^{AH2} - Q_{AH2}}{Q_b^{AH2}} = \frac{6750,1453 - 6719,0917}{6750,1453} = 0,460 \% \quad (6-367)$$

## 6.9 Ekonomizér EKO2

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Trubky jsou z důvodu dosažení větší výhřevné plochy žebrovány.

### 6.9.1 Návrh geometrie



Obrázek 22: Geometrie ekonomizéru 2

#### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:	$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$
Příčná rozteč:	$s_1 = 82 \text{ mm} = 0,082 \text{ m}$
Podélná rozteč:	$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$
Tloušťka žeber:	$t_z = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$
Výška žeber:	$h_z = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$
Průměr žeber:	$D_z = 52 \text{ mm} = 0,052 \text{ m}$
Počet žeber na 1 m trubky:	$n_z = 80 \text{ 1/m}$
Rozteč žeber:	$s_z = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$

#### Geometrie spalinového kanálu

Délka spalinového kanálu:	$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$
Šířka spalinového kanálu:	$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$

**Parametry média**

Tabulka 63: Parametry média ekonomizéru 2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	146	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	169	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00108	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00111	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 64: Parametry spalin ekonomizéru 2 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	301,1	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	244,8	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00108 + 0,00111}{2} = 0,001095 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-368)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{146 + 169}{2} = 157,5 \text{ °C} \quad (6-369)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{301,1 + 244,8}{2} = 272,95 \text{ °C} \quad (6-370)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{157,5 + 272,95}{2} = 215,225 \text{ °C} \quad (6-371)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (6-372)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,001095}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 2,7} = 43,37 \Rightarrow \text{zvoleno 44 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (6-373)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,001095}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} = 2,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Plocha trubek**

$$S_{tr} = n_{tr}^{rad} \cdot D \cdot B + 2 \cdot h_z \cdot t_z \cdot n_z \cdot n_{tr}^{rad} \cdot B \quad (6-374)$$

$$S_{tr} = 44 \cdot 0,032 \cdot 6 + 2 \cdot 0,012 \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 44 \cdot 6$$

$$S_{tr} = 8,9549 \text{ m}^2$$

**Průřez spalin**

$$F_{sp} = A \cdot B - S_{tr} = 6 \cdot 3,650 - 8,9549 = 12,9451 \text{ m}^2 \quad (6-375)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-376)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{272,95 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,1} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 127,5670 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin  $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ 
 $p_b$  – barometrický tlak  $[\text{MPa}]$ 
 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin  $[\text{kPa}]$ 
**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{127,5670}{12,9451} = 9,85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-377)$$

**6.9.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-378)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 65: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0459	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,423 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,6554	$[-]$

**Korekční součinitele**

$$C_z = 1$$

$$C_s = 1$$

**Výhřevná plocha žebor  $\frac{S_z}{S}$** 

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,0248} - \frac{0,001}{0,0248}\right)} = 0,4176 \quad (6-379)$$

**Výhřevná plocha  $\frac{S_h}{S}$** 

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,4176 = 0,5824 \quad (6-380)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{S_z} \cdot \left(\frac{d}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot S_z}{v_s}\right)^{0,72} \quad (6-381)$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0459}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,012}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{9,85 \cdot 0,0125}{0,423 \cdot 10^{-4}}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 83,5576 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel  $\beta$** 

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 83,5576}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,0186 \cdot 0,85 \cdot 83,5576)}} = 39,1152 \quad (6-382)$$

**Součinitel efektivnosti žebra E**

$$\beta \cdot h_z = 39,1152 \cdot 0,012 = 0,4694 \quad (6-383)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,056}{0,032} = 1,75 \quad (6-384)$$

- těmto hodnotám dle grafu [1] odpovídá  $E \cong 0,9$

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{red} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (6-385)$$

$$\alpha_{red} = (0,4176 \cdot 0,9 \cdot 1 + 0,5824) \cdot \frac{0,85 \cdot 83,5576}{1 + 0,0186 \cdot 0,85 \cdot 83,5576} = 28,6221 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$



### 6.9.3 Součinitel přestupu tepla na straně vody

Tabulka 66: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO 2 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{\text{voda}}$	$693 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{\text{voda}}$	$1843 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{\text{voda}} = \eta_{\text{voda}} \cdot \nu_{\text{stř}}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$\text{Pr}_{\text{voda}}$	1,135	[–]

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{\text{voda}}}{d} \cdot \left( \frac{w_{\text{voda}} \cdot d}{\nu_{\text{voda}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{voda}}^{0,4} \quad (6-386)$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0571 \cdot \frac{693 \cdot 10^{-3}}{0,0248} \cdot \left( \frac{2,66 \cdot 0,0248}{2,02 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,135^{0,4}$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 18420,8373 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{T_{\text{stř}}^{\text{st}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{272,95 + 273,15}{215,225 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0571 \quad (6-387)$$

### 6.9.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{red}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{voda}}} \cdot \frac{S_s}{S_v}} = \frac{1}{\frac{1}{28,6221} + \frac{1}{18420,8373} \cdot \frac{0,3720}{0,0779}} = 28,4113 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-388)$$

#### Vnější plocha 1m trubky

$$S_s = \pi \cdot D \cdot l + n_z \cdot (\pi \cdot D_z \cdot t_z) + 2 \cdot n_z \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D^2) \right] - n_z \cdot (\pi \cdot D \cdot t_z) \quad (6-389)$$

$$S_s = \pi \cdot 0,032 \cdot 1 + 80 \cdot (\pi \cdot 0,056 \cdot 0,001) + 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (0,056^2 - 0,032^2) \right] - 80 \cdot (\pi \cdot 0,032 \cdot 0,001)$$

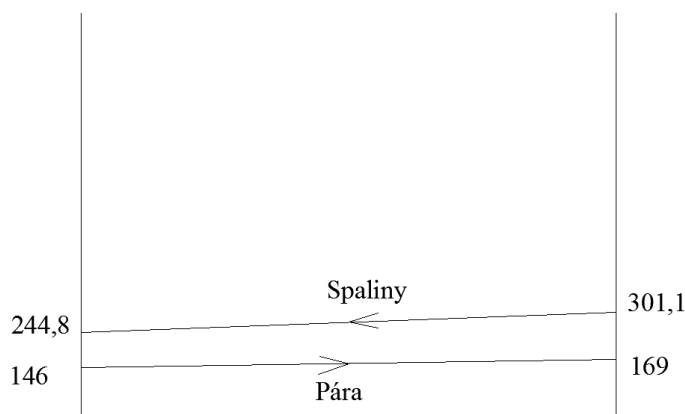
$$S_s = 0,3720 \text{ m}^2$$

#### Vnitřní plocha 1m trubky

$$S_v = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,0248 \cdot 1 = 0,0779 \text{ m}^2 \quad (6-390)$$

## 6.9.5 Tepelný výkon EKO2

### Střední teplotní spád



Obrázek 23: Teplotní spád EKO2

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}}}\right)} = \frac{(244,8 - 146) - (301,1 - 169)}{\ln\left(\frac{244,8 - 146}{301,1 - 169}\right)} = 114,6 \text{ °C} \quad (6-391)$$

### Plocha ohříváku EKO2

$$S_{\text{EKO2}} = \frac{Q_{\text{EKO2}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{5102,5251}{28,4113 \cdot 114,6} = 1567,1458 \text{ m}^2 \quad (6-392)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řada}} = n_{\text{řad}}^{\text{rad}} \cdot B \cdot S_s = 44 \cdot 6 \cdot 0,3720 = 98,2080 \text{ m}^2 \quad (6-393)$$

### Počet řad EKO2

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO2}}}{S_{\text{řada}}} = \frac{1567,1458}{98,2080} = 15,9574 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (6-394)$$

### Skutečná plocha EKO2

$$S_{\text{EKO2}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řada}} = 16 \cdot 98,2080 = 1571,3280 \text{ m}^2 \quad (6-395)$$

### Výška EKO2

$$H_{\text{EKO2}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,08 = 1,2 \text{ m} \quad (6-396)$$

### Tepelný výkon EKO2

$$Q_b^{\text{EKO2}} = S_{\text{EKO2}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 1571,3280 \cdot 28,4113 \cdot 114,6 = 5116,1418 \text{ kW} \quad (6-397)$$

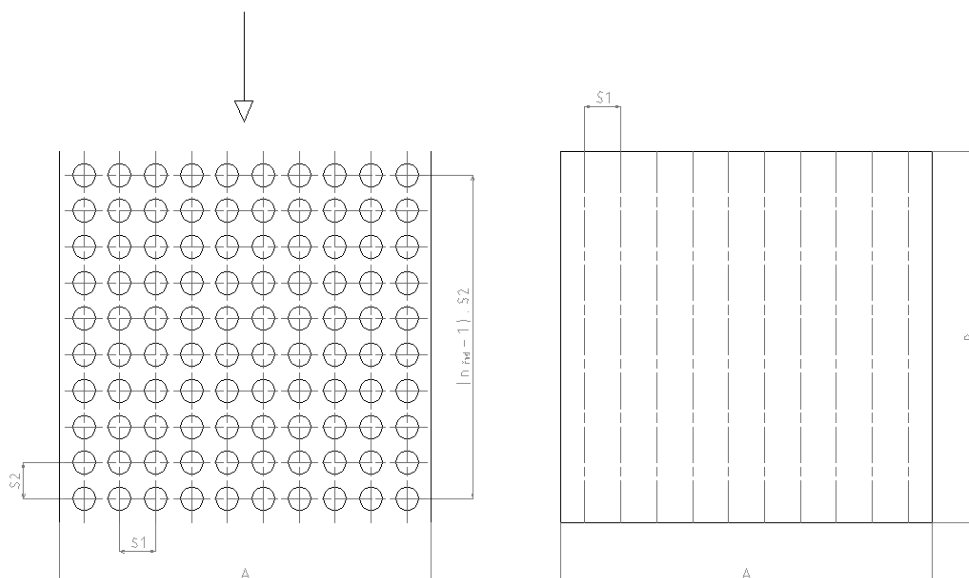
### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{EKO2}} - Q_{\text{EKO2}}}{Q_b^{\text{EKO2}}} = \frac{5116,1418 - 5102,5251}{5116,1418} = 0,266 \% \quad (6-398)$$

## 6.10 Ekonomizér EKO1

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Trubky jsou z důvodu dosažení větší výhřevné plochy žebrovány.

### 6.10.1 Návrh geometrie



Obrázek 24: Geometrie ekonomizéru 1

### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:	$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$
Příčná rozteč:	$s_1 = 82 \text{ mm} = 0,082 \text{ m}$
Podélná rozteč:	$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$
Tloušťka žeber:	$t_z = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$
Výška žeber:	$h_z = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$
Průměr žeber:	$D_z = 52 \text{ mm} = 0,052 \text{ m}$
Počet žeber na 1 m trubky:	$n_z = 80 \text{ 1/m}$
Rozteč žeber:	$s_z = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$

### Geometrie spalinového kanálu

Délka spalinového kanálu:	$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$
Šířka spalinového kanálu:	$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$

**Parametry média**

Tabulka 67: Parametry média ekonomizéru 1

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	130	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	146	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00106	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00108	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 68: Parametry spalin ekonomizéru 1 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	244,8	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	206,1	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00106 + 0,00108}{2} = 0,00107 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6-399)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{130 + 146}{2} = 138 \text{ °C} \quad (6-400)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{244,8 + 206,1}{2} = 225,45 \text{ °C} \quad (6-401)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{138 + 225,45}{2} = 181,725 \text{ °C} \quad (6-402)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 2,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (6-403)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00107}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 2,65} = 43,18 \Rightarrow \text{zvoleno 44 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (6-404)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00107}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} = 2,60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Plocha trubek**

$$S_{tr} = n_{tr}^{rad} \cdot D \cdot B + 2 \cdot h_z \cdot t_z \cdot n_z \cdot n_{tr}^{rad} \cdot B \quad (6-405)$$

$$S_{tr} = 44 \cdot 0,032 \cdot 6 + 2 \cdot 0,012 \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 44 \cdot 6$$

$$S_{tr} = 8,9549 \text{ m}^2$$

**Průřez spalín**

$$F_{sp} = A \cdot B - S_{tr} = 6 \cdot 3,650 - 8,9549 = 12,9451 \text{ m}^2 \quad (6-406)$$

**Skutečný průtok spalín**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{str}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-407)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{225,45 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,1} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 116,4712 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$  – skutečné množství spalín [m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>]

$p_b$  – barometrický tlak [MPa]

$\Delta p_{sp}$  – podtlak spalín [kPa]

**Rychlost spalín**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{116,4712}{12,9451} = 8,90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-408)$$

**6.10.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalín****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-409)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 69: Látkové vlastnosti spalín pro střední teplotu v EKO1 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalín	$\lambda_s$	0,0419	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalín	$\nu_s$	$0,361 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalín	$Pr_s$	0,665	[-]

**Korekční součinitele**

$$C_z = 1$$

$$C_s = 1$$

**Výhřevná plocha žebér  $\frac{S_z}{S}$** 

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,0248} - \frac{0,001}{0,0248}\right)} = 0,4176 \quad (6-410)$$

**Výhřevná plocha  $\frac{S_h}{S}$** 

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,4176 = 0,5824 \quad (6-411)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{S_z} \cdot \left(\frac{d}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot S_z}{u_{sp}}\right)^{0,72} \quad (6-412)$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0419}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,012}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{8,90 \cdot 0,0125}{0,361 \cdot 10^{-4}}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 79,4756 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel  $\beta$** 

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 79,4756}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,0208 \cdot 0,85 \cdot 79,4756)}} = 37,4750 \quad (6-413)$$

**Součinitel efektivnosti žebra E**

$$\beta \cdot h_z = 37,4750 \cdot 0,012 = 0,4497 \quad (6-414)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,056}{0,032} = 1,75 \quad (6-415)$$

- těmto hodnotám dle grafu [1] odpovídá  $E \cong 0,9$

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{red} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (6-416)$$

$$\alpha_{red} = (0,4176 \cdot 0,9 \cdot 1 + 0,5824) \cdot \frac{0,85 \cdot 79,4756}{1 + 0,0208 \cdot 0,85 \cdot 79,4756} = 26,0146 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 6.10.3 Součinitel přestupu tepla na straně vody

Tabulka 70: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO1 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{\text{voda}}$	$694 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{\text{voda}}$	$2150 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{\text{voda}} = \eta_{\text{voda}} \cdot \nu_{\text{stř}}$	$2,31 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$\text{Pr}_{\text{voda}}$	1,312	[–]

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{\text{voda}}}{d} \cdot \left( \frac{w_{\text{voda}} \cdot d}{\nu_{\text{voda}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{voda}}^{0,4} \quad (6-417)$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0469 \cdot \frac{694 \cdot 10^{-3}}{0,0248} \cdot \left( \frac{2,60 \cdot 0,0248}{2,31 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,312^{0,4}$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 17075,1607 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{T_{\text{stř}}^{\text{st}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{225,45 + 273,15}{181,725 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0469 \quad (6-418)$$

### 6.10.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{red}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{voda}}} \cdot \frac{S_s}{S_v}} = \frac{1}{\frac{1}{26,0146} + \frac{1}{17075,1607} \cdot \frac{0,3720}{0,0779}} = 25,8267 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-419)$$

#### Vnější plocha 1m trubky

$$S_s = \pi \cdot D \cdot l + n_z \cdot (\pi \cdot D_z \cdot t_z) + 2 \cdot n_z \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D^2) \right] - n_z \cdot (\pi \cdot D \cdot t_z) \quad (6-420)$$

$$S_s = \pi \cdot 0,032 \cdot 1 + 80 \cdot (\pi \cdot 0,056 \cdot 0,001) + 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (0,056^2 - 0,032^2) \right] - 80 \cdot (\pi \cdot 0,032 \cdot 0,001)$$

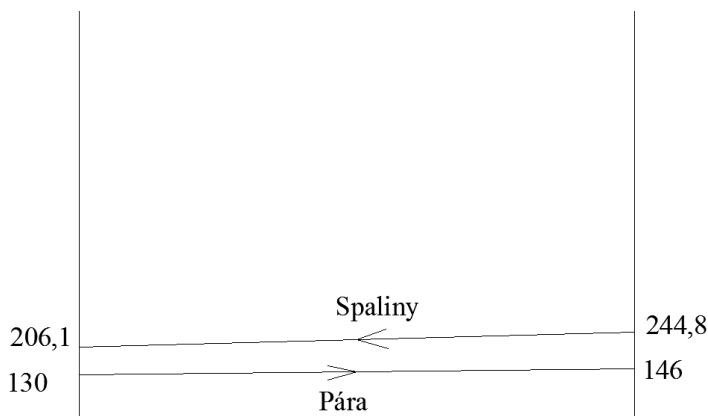
$$S_s = 0,3720 \text{ m}^2$$

#### Vnitřní plocha 1m trubky

$$S_v = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,0248 \cdot 1 = 0,0779 \text{ m}^2 \quad (6-421)$$

## 6.10.5 Tepelný výkon EKO1

### Střední teplotní spád



Obrázek 25: Teplotní spád EKO1

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}}}\right)} = \frac{(206,1 - 130) - (244,8 - 146)}{\ln\left(\frac{206,1 - 130}{244,8 - 146}\right)} = 86,9 \text{ °C} \quad (6-422)$$

### Plocha ohříváku EKO1

$$S_{\text{EKO1}} = \frac{Q_{\text{EKO1}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{3512,6516}{25,8267 \cdot 86,9} = 1565,1155 \text{ m}^2 \quad (6-423)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řada}} = n_{\text{tr}}^{\text{řad}} \cdot B \cdot S_s = 44 \cdot 6 \cdot 0,3720 = 98,2080 \text{ m}^2 \quad (6-424)$$

### Počet řad EKO1

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO1}}}{S_{\text{řada}}} = \frac{1565,1155}{98,2080} = 15,9367 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (6-425)$$

### Skutečná plocha EKO1

$$S_{\text{EKO1}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řada}} = 16 \cdot 98,2080 = 1571,3280 \text{ m}^2 \quad (6-426)$$

### Výška EKO1

$$H_{\text{EKO1}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,08 = 1,2 \text{ m} \quad (6-427)$$

### Tepelný výkon EKO1

$$Q_b^{\text{EKO1}} = S_{\text{EKO1}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 1571,3280 \cdot 25,8267 \cdot 86,9 = 3526,5946 \text{ kW} \quad (6-428)$$

### Kontrola

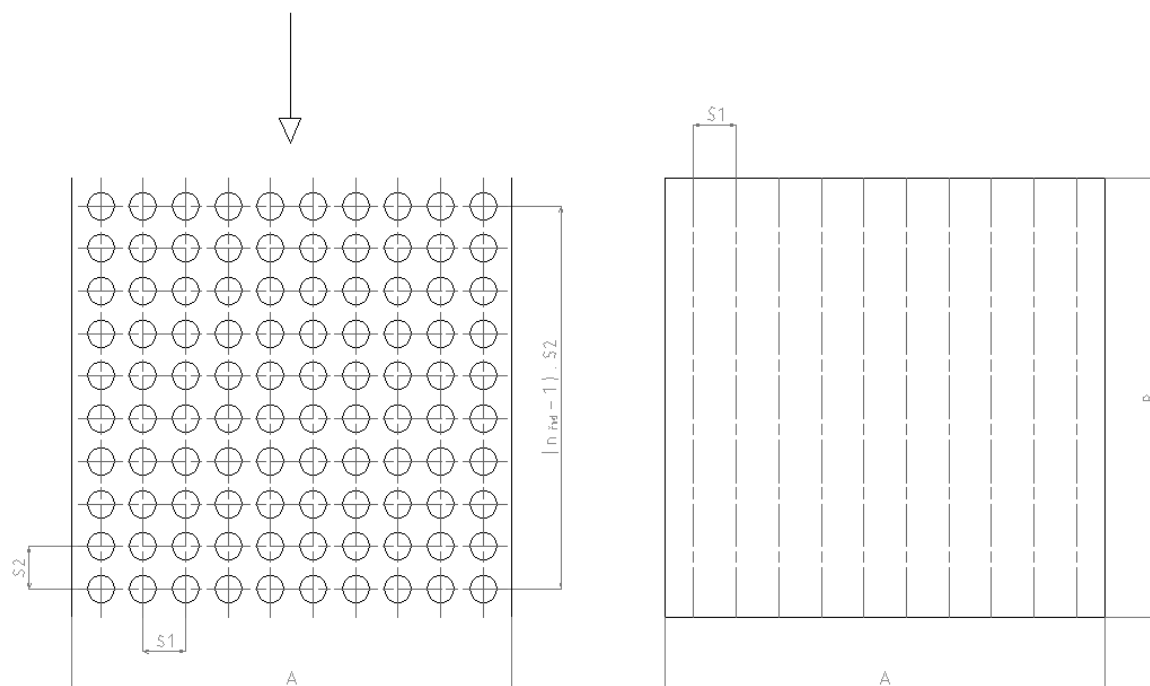
$$\frac{Q_b^{\text{EKO1}} - Q_{\text{EKO1}}}{Q_b^{\text{EKO1}}} = \frac{3526,5946 - 3512,6516}{3526,5946} = 0,395 \% \quad (6-429)$$



## 6.11 Ohříváku vzduchu AH1

Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 6.11.1 Návrh geometrie



Obrázek 26: Geometrie ohříváku vzduchu AH1

#### Návrh geometrie ohříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0025 = 0,0395 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 95 \text{ mm} = 0,095 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 60 \text{ mm} = 0,060 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3500 \text{ mm} = 3,500 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 71: Parametry média ohříváku vzduchu AH1

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{vzd}$	100	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{vzd}$	150	°C

**Parametry spalin**

Tabulka 72: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH1 pro hnědé uhlí

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	206,1	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	160	°C

**Střední hodnoty**

Střední teplota média: 
$$t_{stř}^{vzd} = \frac{t_{in}^{vzd} + t_{out}^{vzd}}{2} = \frac{100 + 150}{2} = 125 \text{ °C} \quad (6-430)$$

Střední teplota spalin: 
$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{206,1 + 160}{2} = 183,05 \text{ °C} \quad (6-431)$$

Střední teplota stěny: 
$$t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{vzd} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{125 + 183,05}{2} = 154,025 \text{ °C} \quad (6-432)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-433)$$

$$V_{sp} = 8,5711 \cdot \frac{183,05 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,6} \cdot 7,3636$$

$$V_{sp} = 107,1010 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_b$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{sp}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

**Skutečný průtok vzduchu v AH1**

$$V_{vzd} = O_{vz \min} \cdot \beta \cdot \frac{t_{stř}^{vzd} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b + \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (6-434)$$

$$V_{vzd} = 6,1052 \cdot 1,25 \cdot \frac{125 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 + 5} \cdot 7,3636$$

$$V_{vzd} = 78,0597 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

**Počet paralelních trubek**

- zvolená rychlost vzduchu  $w_{vzd} = 24,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{vzd}} = \frac{4 \cdot 78,0597}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 24,5} = 2600,02 \Rightarrow \text{zvoleno 2604 trubek} \quad (6-435)$$

**Korigovaná rychlost vzduchu**

$$w_{vzd} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot 78,0597}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 2604} = 24,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-436)$$

**Počet trubek jedné řady**

$$n_{tr}^{řad} = \frac{B}{s_1} = \frac{6}{0,095} = 63,16 \Rightarrow \text{zvoleno 62 trubek} \quad (6-437)$$

**Počet řad**

$$n^{řad} = \frac{n_{tr}}{n_{tr}^{řad}} = \frac{2604}{62} = 42 \text{ řad} \quad (6-438)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{řad} \cdot A \cdot D) = 3,500 \cdot 6 - (62 \cdot 3,500 \cdot 0,0445) = 11,3435 \text{ m}^2 \quad (6-439)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{107,1010}{11,3435} = 9,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6-440)$$

**6.11.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (6-441)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,5361 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 5,9890}{8,5711} = 0,0673$$

Tabulka 73: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH1 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0384	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,308 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,6734	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6-442)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9176 \cdot \frac{0,0384}{0,0445} \cdot \left( \frac{9,44 \cdot 0,0445}{0,308 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6734^{0,33} = 67,7006 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,1348 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,3483}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,9176 \quad (6-443)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,1348 \quad (6-444) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,060}{0,0445} = 1,3483 \quad (6-445)$$

**6.11.3 Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu**

Tabulka 74: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH1 pro hnědé uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{vzd}$	$33,6 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\nu_{vzd}$	$261 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_{vzd}$	0,69	[–]

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vzd} \cdot d}{\nu_{vzd}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6-446)$$

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0334 \cdot \frac{33,6 \cdot 10^{-3}}{0,0395} \cdot \left( \frac{24,46 \cdot 0,0395}{261 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} = 78,8818 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{183,05 + 273,15}{154,025 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0334 \quad (6-447)$$

**Součinitel prostupu tepla**

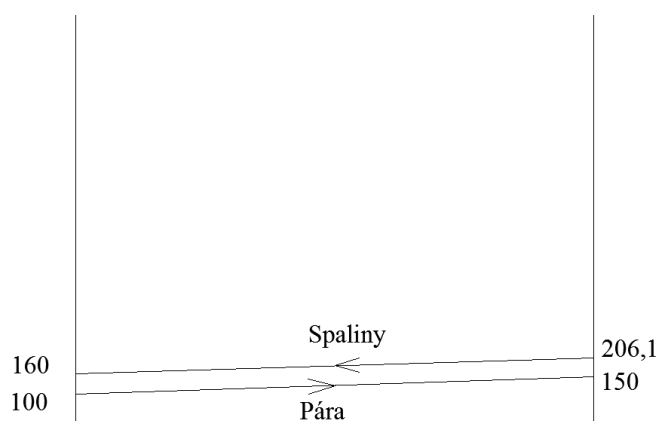
$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{k,př} \cdot \alpha_{vzd}}{\alpha_{k,př} + \alpha_{vzd}} = 0,72 \cdot \frac{67,7006 \cdot 78,8818}{67,7006 + 78,8818} = 26,4313 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6-448)$$

kde:

$$\xi \quad \text{– součinitel využití plochy [1]} \quad [-]$$

### 6.11.4 Tepelný výkon AH1

#### Střední teplotní spád



Obrázek 27: Teplotní spád AH1

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}}}\right)} = \frac{(160 - 100) - (206,1 - 150)}{\ln\left(\frac{160 - 100}{206,1 - 150}\right)} = 58,1 \text{ °C} \quad (6-449)$$

#### Plocha ohříváku AH1

$$S_{\text{AH1}} = \frac{Q_{\text{AH1}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{3703,6331}{26,4313 \cdot 58,1} = 2411,7283 \text{ m}^2 \quad (6-450)$$

#### Plocha jedné části

$$S_{\text{část}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 2604 \cdot \pi \cdot \frac{0,0445 + 0,0395}{2} \cdot 3,500 = 1202,5640 \text{ m}^2 \quad (6-451)$$

#### Počet částí

$$n_{\text{část}} = \frac{S_{\text{AH1}}}{S_{\text{část}}} = \frac{2411,7283}{1202,5640} = 2,0055 \Rightarrow 2 \text{ části} \quad (6-452)$$

#### Skutečná plocha ohříváku AH1

$$S_{\text{AH1}}^{\text{skut}} = n_{\text{část}} \cdot S_{\text{část}} = 2 \cdot 1202,5640 = 2405,1280 \text{ m}^2 \quad (6-453)$$

#### Výška jedné části

$$H_{\text{AH1}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (42 - 1) \cdot 0,06 = 2,460 \text{ m} \quad (6-454)$$

#### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{AH1}} = S_{\text{AH1}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 2405,1280 \cdot 26,4313 \cdot 58,1 = 3693,4553 \text{ kW} \quad (6-455)$$

#### Kontrola

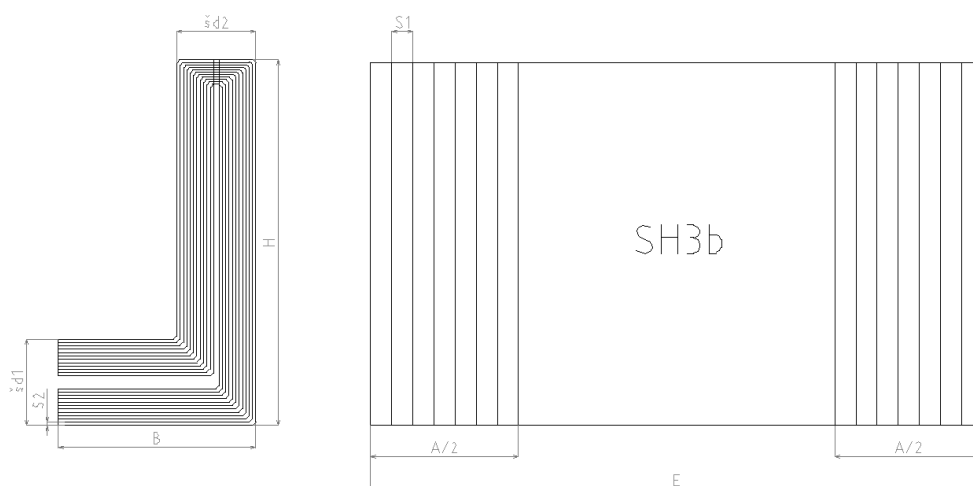
$$\frac{Q_b^{\text{AH1}} - Q_{\text{AH1}}}{Q_b^{\text{AH1}}} = \frac{3693,4553 - 3703,6331}{3693,4553} = -0,276 \% \quad (6-456)$$

## 7 Výpočet konvekčních ploch – dřevní štěpka

### 7.1 Deskový přehřívák SH3A

Přehřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných do desek. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

#### 7.1.1 Návrh geometrie



Obrázek 28: Geometrie přehříváku SH3A

#### Návrh geometrie deskového přehříváku

Vnější průměr trubky:  $D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$

Tloušťka stěny:  $s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$

Vnitřní průměr trubky:  $d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0333 \text{ m}$

Příčná rozteč (vzdálenost mezi deskami):  $s_1 = 25 \text{ mm} = 0,425 \text{ m}$

Podélná rozteč:  $s_2 = 53 \text{ mm} = 0,053 \text{ m}$

#### Geometrie spalínového kanálu

Výška spalínového kanálu:  $H = 6008 \text{ mm} = 6,008 \text{ m}$

Šířka spalínového kanálu:  $A = 7070 \text{ mm} = 7,070 \text{ m}$

Délka spalínového kanálu:  $B = 3079 \text{ mm} = 3,079 \text{ m}$

Celková šířka:  $E = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$

Uzavřená plocha stěn:  $S_{st} = 2 \cdot [(H \cdot B) + (B \cdot A) + (A \cdot H)]$  (7-1)

$$S_{st} = 2 \cdot [(6,008 \cdot 3,079) + (3,079 \cdot 7,070) + (7,070 \cdot 6,008)]$$

$$S_{st} = 165,4874 \text{ m}^2$$

**Geometrie desek deskového přehříváku SH3A**Počet trubek v desce:  $z_2 = 12$  trubekPočet desek:  $n_d = 16$  desekCelkový počet trubek:  $n_{tr} = z_2 \cdot n_d = 12 \cdot 16 = 192$  trubek (7-2)Příčná šířka desky:  $s_{d1} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,176$  (7-3)

$$s_{d1} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,176 = 1,342 \text{ m}$$

Podélná šířka desky:  $s_{d2} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,100$  (7-4)

$$s_{d2} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,100 = 1,266 \text{ m}$$

Plocha 1 desky:

$$S_d = 2 \cdot [s_{d1} \cdot B + (H - s_{d1}) \cdot s_{d2}] + D \cdot (2 \cdot H + 2 \cdot B - s_{d2})$$
 (7-5)

$$S_d = 2 \cdot [1,342 \cdot 3,079 + (6,008 - 1,342) \cdot 1,266] + 0,0445 \cdot (2 \cdot 6,008 + 2 \cdot 3,079 - 1,266)$$

$$S_d = 20,8307 \text{ m}^2$$

Plocha desek:  $S_{SH3A} = S_d \cdot n_d = 20,8307 \cdot 16 = 333,2920 \text{ m}^2$  (7-6)**Parametry média**

Tabulka 75: Parametry média deskového přehříváku SH3A

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	395,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	435,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02761	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03047	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 76: Parametry spalin deskového přehříváku SH3A pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	969	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	906,3	°C

**Střední hodnoty**Střední měrný objem:  $v_{str} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02761 + 0,03047}{2} = 0,02904 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (7-7)Střední teplota média:  $t_{str}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{395,6 + 435,2}{2} = 415,4 \text{ °C}$  (7-8)

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{969 + 906,3}{2} = 937,65 \text{ °C} \quad (7-9)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{\text{stř}}^{\text{st}} = \frac{t_{\text{stř}}^{\text{par}} + t_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{415,4 + 937,65}{2} = 676,525 \text{ °C} \quad (7-10)$$

### Skutečný průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (7-11)$$

$$V_{\text{sp}} = \frac{5,5818}{2} \cdot \frac{937,65 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,2} \cdot 10,5782$$

$$V_{\text{sp}} = 131,1249 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin

$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$p_b$  – barometrický tlak

$[\text{MPa}]$

$\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

$[\text{kPa}]$

### Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{F_{\text{sp}}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{A \cdot B \cdot (s_1 - D)} = \frac{131,1249 \cdot 0,425}{7,070 \cdot 3,079 \cdot (0,425 - 0,0445)} = 6,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-12)$$

### Rychlost páry

$$w_{\text{par}} = \frac{4 \cdot (M_{\text{pp}} - M_{\text{v2}}) \cdot v_{\text{stř}}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{tr}}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5) \cdot 0,02904}{\pi \cdot 0,03332^2 \cdot 192} = 9,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-13)$$

## 7.1.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot B - n_{\text{tr}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{2 \cdot (A + B) + n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot 7,070 \cdot 3,079 - 192 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4}}{2 \cdot (7,070 + 3,079) + 192 \cdot \pi \cdot 0,0445} = 1,8408 \text{ m} \quad (7-14)$$

### Poměrný objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^s}{O_{\text{sp}}} \quad (7-15)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5186}{5,5818} = 0,1519$$



Tabulka 77: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3A pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,1023	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,5862	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-16)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2344 \cdot \frac{0,1023}{0,0445} \cdot \left( \frac{6,73 \cdot 0,0445}{1,6 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,5862^{0,33} = 12,1039 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 9,5505 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,1910}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,2344 \quad (7-17)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,425}{0,0445} = 9,5505 \quad (7-18)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,053}{0,0445} = 1,1910 \quad (7-19)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při podélném obtékání**

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-20)$$

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{0,1023}{1,8408} \cdot \left( \frac{6,73 \cdot 1,8408}{1,6 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5862^{0,4} = 8,4127 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**7.1.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 78: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3A pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	0,06932	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$2,49 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot v_{stř}$	$7,238 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,086	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-21)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,1291 \cdot \frac{0,06932}{0,0333} \cdot \left( \frac{9,56 \cdot 0,0333}{7,238 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,086^{0,4} = 1827,3988 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{937,65 + 273,15}{676,525 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,1291 \quad (7-22)$$

### 7.1.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (7-23)$$

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2453 \cdot (937,65 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{530,8 + 273,15}{937,65 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{530,8 + 273,15}{937,65 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sál} = 53,5558 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$  – stupeň černosti povrchu stěn [1] [-]

$a$  – stupeň černosti spalin při teplotě spalin [-]

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

$T_z$  – teplota povrchu nánosů na straně spalin [K]

### Velikost sálavé plochy

$$S_{sál} = S_{SH3A} \cdot x = 333,2920 \cdot 0,95 = 316,6274 \text{ m}^2 \quad (7-24)$$

$x$  – součinitel úhlového osálení desek [1] [-]

### Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH3A}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (7-25)$$

$$t_z = 415,4 + \left( 0,0052 + \frac{1}{1822,0579} \right) \cdot \frac{6355,8937}{316,6274} \cdot 10^3 = 530,8 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$  – součinitel zanesení [1] [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{A \cdot B \cdot H}{S_{\text{SH3A}} + S_{\text{st}}} = \frac{7,070 \cdot 3,079 \cdot 6,008}{333,2920 + 165,4874} = 0,9440 \text{ m} \quad (7-26)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-27)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-28)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{1000} \right) \cdot r_{\text{sp}} \quad (7-29)$$

$$k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,9440}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{937,65 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} = 2,8282 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_{\text{s}} = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{\text{vz min}} \quad (7-30)$$

$$G_{\text{s}} = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{\text{pk}} = \frac{[A^r \cdot (x_{\text{ú}} + 1)]}{2 \cdot G_{\text{s}}} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-31)$$

**Součinitel zeslabení sálení popilkovými částicemi**

$$k_{\text{p}} \cdot \mu_{\text{pk}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{\text{pk}}}{\sqrt[3]{(t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15)^2 \cdot d_{\text{pk}}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(937,65 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,1538 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-32)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_{\text{p}} \cdot \mu) \cdot p_{\text{sp}} \cdot s = (2,8282 + 0,1538) \cdot 0,1 \cdot 0,9440 = 0,2815 \quad (7-33)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2815} = 0,2453 \quad (7-34)$$

### 7.1.5 Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla

#### Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin

součinitel využití deskového přehříváku  $\xi = 0,83$

#### Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_{spř} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,př} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-35)$$

$$\alpha_{spř} = 0,83 \cdot \left( 12,1039 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 53,5558 \right) = 57,3984 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

$$\alpha_{spod} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,pod} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-36)$$

$$\alpha_{spod} = 0,83 \cdot \left( 8,4127 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 53,5558 \right) = 53,1451 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Podíl tepla vysálaného z ohniště předaného do deskového přehříváku

$$m = \frac{Q_{ods}}{Q_{SH3A}} = \frac{5200,9085}{6355,8937} = 0,4091 \quad (7-37)$$

#### Součinitel prostupu tepla pro příčné proudění

$$k_{př} = \frac{\alpha_{spř}}{1 + \alpha_{spř} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (7-38)$$

$$k_{př} = \frac{57,3984}{1 + 57,3984 \cdot \left( 0,0052 + \frac{1}{1827,3988} \right) \cdot (1 + 0,4091)} = 39,1842 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k_{pod} = \frac{\alpha_{spod}}{1 + \alpha_{spod} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (7-39)$$

$$k_{pod} = \frac{53,1451}{1 + 53,1451 \cdot \left( 0,0052 + \frac{1}{1827,3988} \right) \cdot (1 + 0,4091)} = 37,1542 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

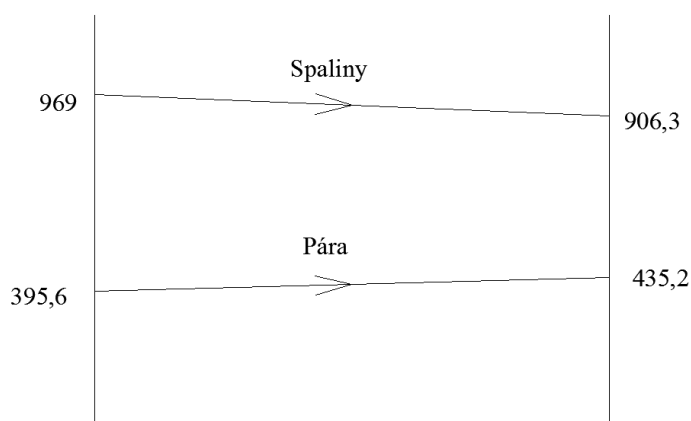
**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$\text{Plocha omývaná příčně} \quad S_{př} = 0,7 \cdot S_{sál} = 0,7 \cdot 316,6274 = 221,6392 \text{ m}^2 \quad (7-40)$$

$$\text{Plocha omývaná podélně} \quad S_{pod} = 0,3 \cdot S_{sál} = 0,3 \cdot 316,6274 = 94,9882 \text{ m}^2 \quad (7-41)$$

$$k = \frac{k_{pod} \cdot S_{pod} + k_{př} \cdot S_{př}}{S_{sál}} \quad (7-42)$$

$$k = \frac{37,1542 \cdot 94,9882 + 39,1842 \cdot 221,6392}{316,6274} = 38,5752 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**7.1.6 Tepelný výkon deskového přehříváku SH3A****Střední teplotní spád**

Obrázek 29: Teplotní spád SH3A

$$\Delta t = (t_{stř}^{sp} - t_{stř}^{par}) = (937,65 - 415,4) = 522,25 \text{ °C} \quad (7-43)$$

**Tepelný výkon SH3A**

$$Q_b^{SH3A} = S_{sál} \cdot k \cdot \Delta t = 316,6274 \cdot 38,5752 \cdot 522,25 = 6378,7434 \text{ kW} \quad (7-44)$$

**Kontrola**

$$\frac{Q_b^{SH3A} - Q_{SH3A}}{Q_b^{SH3A}} = \frac{6378,7434 - 6355,8937}{6378,7434} = 0,358 \% \quad (7-45)$$

### 7.1.7 Výpočet výkonu paralelních ploch

#### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet trubek:} \quad n_{\text{tr}}^{\text{par}} = 96$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

#### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot B - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}^2}}{4}}{2 \cdot (A + B) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 7,070 \cdot 3,079 - 96 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (7,070 + 3,079) + 96 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 1,3772 \text{ m} \quad (7-46)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_s^{0,4} \quad (7-47)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,1023}{1,3772} \cdot \left( \frac{6,73 \cdot 1,3772}{1,6 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5862^{0,4} = 8,9154 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 53,5558 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-48)$$

#### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (7-49)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 8,9154 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 53,5558 \right) = 53,6134 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

#### Součinitel prostupu tepla

#### Podíl z tepla vysálaného z ohniště předaného do stěn

$$m^{\text{par}} = \frac{Q_{\text{ods}}}{Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{5200,9085}{1050} = 1,2383 \quad (7-50)$$

kde:

$Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}$  – odhadnutý výkon paralelních ploch [kW]

**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}} \cdot (1 + m^{\text{par}})} \quad (7-51)$$

$$k^{\text{par}} = \frac{53,6134}{1 + 53,6134 \cdot 0,0052 \cdot (1 + 1,2383)} = 33,0129 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$$\varepsilon^{\text{par}} \quad - \text{ součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = \frac{[(A \cdot H) + (A \cdot B) + 2 \cdot (H \cdot B)]}{2} \cdot x \quad (7-52)$$

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = \frac{[(7,070 \cdot 6,008) + (7,070 \cdot 3,079) + 2 \cdot (6,008 \cdot 3,079)]}{2} \cdot 0,9 = 45,5591 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{\text{ln}} = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{sy}} = 937,65 - 313,2 = 624,45 \text{ °C} \quad (7-53)$$

**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_b^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 45,5591 \cdot 33,0129 \cdot 624,45 = 1039,1965 \text{ kW} \quad (7-54)$$

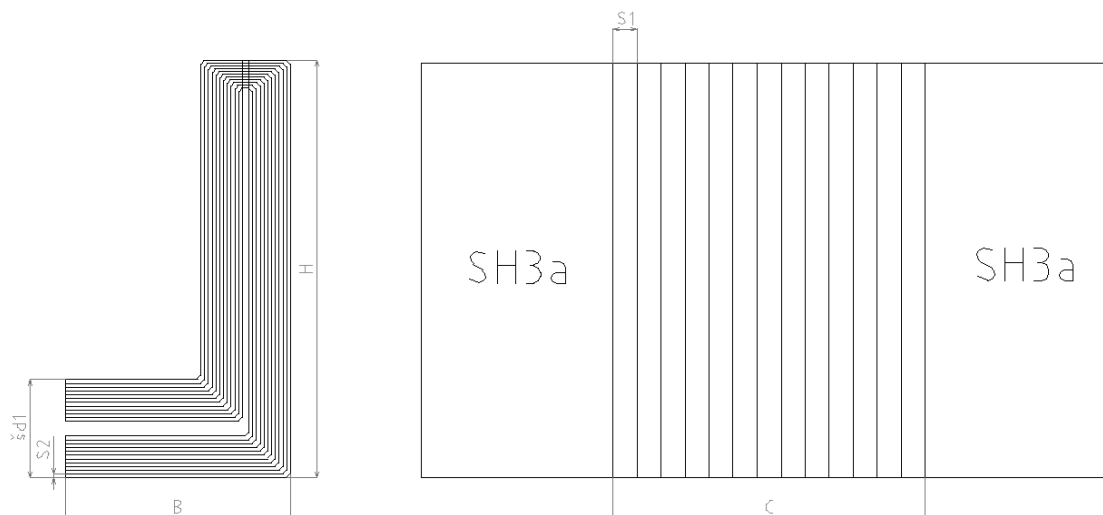
**Celkový výkon paralelních ploch**

$$Q_{b,\text{celk}}^{\text{par}} = 2 \cdot Q_b^{\text{par}} = 2 \cdot 1039,1965 = 2078,3931 \text{ kW} \quad (7-55)$$

## 7.2 Deskový přehřívák SH3B

Přehřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných do desek. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

### 7.2.1 Návrh geometrie



Obrázek 30: Geometrie přehříváku SH3B

### Návrh geometrie deskového přehříváku

Vnější průměr trubky:  $D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$

Tloušťka stěny:  $s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$

Vnitřní průměr trubky:  $d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0333 \text{ m}$

Příčná rozteč (vzdálenost mezi deskami):  $s_1 = 425 \text{ mm} = 0,425 \text{ m}$

Podélná rozteč:  $s_2 = 53 \text{ mm} = 0,053 \text{ m}$

### Geometrie spalínového kanálu

Výška spalínového kanálu:  $H = 6008 \text{ mm} = 6,008 \text{ m}$

Šířka spalínového kanálu:  $C = 5950 \text{ mm} = 5,950 \text{ m}$

Délka spalínového kanálu:  $B = 3079 \text{ mm} = 3,079 \text{ m}$

Uzavřená plocha stěn:  $S_{st} = 2 \cdot [(H \cdot B) + (B \cdot A) + (A \cdot H)] \quad (7-56)$

$$S_{st} = 2 \cdot [(6,008 \cdot 3,079) + (3,079 \cdot 5,950) + (5,950 \cdot 6,008)]$$

$$S_{st} = 145,1326 \text{ m}^2$$



**Geometrie desek deskového přehříváku SH3B**Počet trubek v desce:  $z_2 = 12$  trubekPočet desek:  $n_d = 14$  desekCelkový počet trubek:  $n_{tr} = z_2 \cdot n_d = 12 \cdot 14 = 168$  trubek (7- 57)Příčná šířka desky:  $s_{d1} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,176$  (7- 58)

$$s_{d1} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,176 = 1,342 \text{ m}$$

Podélná šířka desky:  $s_{d2} = 2 \cdot (z_2 - 1) \cdot s_2 + 0,100$  (7- 59)

$$s_{d2} = 2 \cdot (12 - 1) \cdot 0,053 + 0,100 = 1,266 \text{ m}$$

Plocha 1 desky:

$$S_d = 2 \cdot [s_{d1} \cdot B + (H - s_{d1}) \cdot s_{d2}] + D \cdot (2 \cdot H + 2 \cdot B - s_{d2}) \quad (7- 60)$$

$$S_d = 2 \cdot [1,342 \cdot 3,079 + (6,008 - 1,342) \cdot 1,266] + 0,0445 \cdot (2 \cdot 6,008 + 2 \cdot 3,079 - 1,266)$$

$$S_d = 20,8307 \text{ m}^2$$

Plocha desek:  $S_{SH3B} = S_d \cdot n_d = 20,8307 \cdot 14 = 291,6298 \text{ m}^2$  (7- 61)**Parametry média**

Tabulka 79: Parametry média deskového přehříváku SH3B

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	435,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	470	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,03047	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,0328	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 80: Parametry spalin deskového přehříváku SH3B pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	969	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	916,6	°C

**Střední hodnoty**Střední měrný objem:  $v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,03047 + 0,0328}{2} = 0,03164 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (7- 62)Střední teplota média:  $t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{435,2 + 470}{2} = 452,6 \text{ °C}$  (7- 63)

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{969 + 916,6}{2} = 942,8 \text{ °C} \quad (7-64)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{\text{stř}}^{\text{st}} = \frac{t_{\text{stř}}^{\text{par}} + t_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{452,6 + 942,8}{2} = 697,7 \text{ °C} \quad (7-65)$$

### Skutečný průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (7-66)$$

$$V_{\text{sp}} = \frac{5,5818}{2} \cdot \frac{942,8 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,2} \cdot 10,5782$$

$$V_{\text{sp}} = 131,6826 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin

$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$p_b$  – barometrický tlak

$[\text{MPa}]$

$\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

$[\text{kPa}]$

### Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{F_{\text{sp}}} = \frac{V_{\text{sp}} \cdot s_1}{C \cdot B \cdot (s_1 - D)} = \frac{131,6826 \cdot 0,425}{5,950 \cdot 3,079 \cdot (0,425 - 0,0445)} = 8,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-67)$$

### Rychlost páry

$$w_{\text{par}} = \frac{4 \cdot (M_{\text{pp}} - M_{\text{v2}}) \cdot v_{\text{stř}}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{tr}}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5) \cdot 0,03164}{\pi \cdot 0,0333^2 \cdot 168} = 11,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-68)$$

## 7.2.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot C \cdot B - n_{\text{tr}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{2 \cdot (C + B) + n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot 5,950 \cdot 3,079 - 168 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4}}{2 \cdot (5,950 + 3,079) + 168 \cdot \pi \cdot 0,0445} = 1,7576 \text{ m} \quad (7-69)$$

### Poměrný objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (7-70)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5186}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 81: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3B pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,1028	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,5857	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-71)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2344 \cdot \frac{0,1028}{0,0445} \cdot \left( \frac{8,03 \cdot 0,0445}{1,61 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,5857^{0,33} = 13,5836 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 9,5505 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,1910}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,2344 \quad (7-72)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,425}{0,0445} = 9,5505 \quad (7-73) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,053}{0,0445} = 1,1910 \quad (7-74)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při podélném obtékání**

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-75)$$

$$\alpha_{k,pod} = 0,023 \cdot \frac{0,1028}{1,7576} \cdot \left( \frac{8,03 \cdot 1,7576}{1,61 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5857^{0,4} = 9,7751 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**7.2.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 82: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3B pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	0,07242	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot v_{stř}$	$8,450 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,005	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-76)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,1191 \cdot \frac{0,07242}{0,0333} \cdot \left( \frac{11,91 \cdot 0,0333}{8,450 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,005^{0,4} = 1932,3103 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{942,8 + 273,15}{697,7 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,1191 \quad (7-77)$$

### 7.2.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

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

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2405 \cdot (942,8 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{562,4 + 273,15}{942,8 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{562,4 + 273,15}{942,8 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sál} = 55,0932 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

### Velikost sálavé plochy

$$S_{sál} = S_{SH3B} \cdot x = 291,6298 \cdot 0,95 = 277,0483 \text{ m}^2 \quad (7-79)$$

$$x \quad \text{– součinitel úhlového osálení desek [1]} \quad [–]$$

### Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH3B}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (7-80)$$

$$t_z = 452,6 + \left( 0,0052 + \frac{1}{1932,3103} \right) \cdot \frac{5319,9125}{277,0483} \cdot 10^3 = 562,4 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{C \cdot B \cdot H}{S_{SH3B} + S_{st}} = \frac{5,950 \cdot 3,079 \cdot 6,008}{291,6298 + 145,1326} = 0,9072 \text{ m} \quad (7-81)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-82)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-83)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-84)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,9072}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{942,8 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 2,8798 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-85)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-86)$$

**Součinitel zeslabení sálení popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(942,8 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,1534 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-87)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (2,8798 + 0,1534) \cdot 0,1 \cdot 0,9072 = 0,2751 \quad (7-88)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2751} = 0,2405 \quad (7-89)$$

## 7.2.5 Hodnoty součinitele prostupu a přestupu tepla

součinitel využití deskového přehříváku  $\xi = 0,83$

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

$$\alpha_{spř} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,př} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-90)$$

$$\alpha_{spř} = 0,83 \cdot \left( 13,5836 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 55,0932 \right) = 60,3795 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

$$\alpha_{spod} = \xi \cdot \left( \alpha_{k,pod} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-91)$$

$$\alpha_{spod} = 0,83 \cdot \left( 9,7751 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,95} + 55,0932 \right) = 55,9910 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Podíl tepla vysálaného z ohniště předaného do deskového přehříváku

$$m = \frac{Q_{ods}}{Q_{SH3B}} = \frac{5200,9085}{5319,9125} = 0,4888 \quad (7-92)$$

### Součinitel prostupu tepla pro příčné proudění

$$k_{př} = \frac{\alpha_{spř}}{1 + \alpha_{spř} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (7-93)$$

$$k_{př} = \frac{60,3795}{1 + 60,3795 \cdot \left( 0,0052 + \frac{1}{1932,3103} \right) \cdot (1 + 0,4888)} = 39,8817 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k_{pod} = \frac{\alpha_{spod}}{1 + \alpha_{spod} \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot (1 + m)} \quad (7-94)$$

$$k_{pod} = \frac{55,9910}{1 + 55,9910 \cdot \left( 0,0052 + \frac{1}{1932,3103} \right) \cdot (1 + 0,4888)} = 37,9186 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

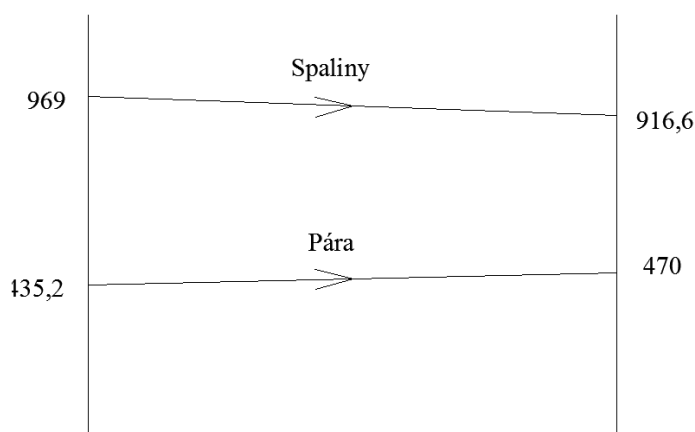
**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$\text{Plocha omývaná příčně} \quad S_{př} = 0,7 \cdot S_{sál} = 0,7 \cdot 277,0483 = 193,9338 \text{ m}^2 \quad (7-95)$$

$$\text{Plocha omývaná podélně} \quad S_{pod} = 0,3 \cdot S_{sál} = 0,3 \cdot 277,0483 = 83,1145 \text{ m}^2 \quad (7-96)$$

$$k = \frac{k_{pod} \cdot S_{pod} + k_{př} \cdot S_{př}}{S_{sál}} \quad (7-97)$$

$$k = \frac{37,9186 \cdot 83,1145 + 39,8817 \cdot 193,9338}{277,0483} = 39,2927 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**7.2.6 Tepelný výkon deskového přehříváku SH3B****Střední teplotní spád**

Obrázek 31: Teplotní spád SH3B

$$\Delta t = (t_{stř}^{sp} - t_{stř}^{par}) = (942,8 - 452,6) = 490,2 \text{ °C} \quad (7-98)$$

**Tepelný výkon SH3B**

$$Q_b^{SH3B} = S_{sál} \cdot k \cdot \Delta t = 277,0483 \cdot 39,2927 \cdot 490,2 = 5336,3053 \text{ kW} \quad (7-99)$$

**Kontrola**

$$\frac{Q_b^{SH3B} - Q_{SH3B}}{Q_b^{SH3B}} = \frac{5336,3053 - 5319,9125}{5336,3053} = 0,307 \% \quad (7-100)$$

## 7.2.7 Výpočet výkonu paralelních ploch

### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet trubek:} \quad n_{\text{tr}}^{\text{par}} = 84$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot C \cdot B - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}2}}{4}}{2 \cdot (C + B) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 5,950 \cdot 3,079 - 84 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (5,950 + 3,079) + 84 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 2,1501 \text{ m} \quad (7-101)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (7-102)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,1028}{2,1501} \cdot \left( \frac{8,03 \cdot 2,1501}{1,61 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5857^{0,4} = 9,3888 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 55,0932 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-103)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (7-104)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 9,3888 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 55,0932 \right) = 55,3759 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

### Součinitel prostupu tepla

#### Podíl z tepla vysálaného z ohniště předaného do stěn

$$m^{\text{par}} = \frac{Q_{\text{ods}}}{Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}} = \frac{5200,9085}{750} = 3,4673 \quad (7-105)$$

kde:

$Q_{\text{SH3A}}^{\text{par}}$  – odhadnutý výkon paralelních ploch [kW]



**Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění**

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}} \cdot (1 + m^{\text{par}})} \quad (7-106)$$

$$k^{\text{par}} = \frac{55,3759}{1 + 55,3759 \cdot 0,0052 \cdot (1 + 3,4673)} = 24,2199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$$\varepsilon^{\text{par}} \quad - \text{ součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = (C \cdot H + C \cdot B) \cdot x = (5,950 \cdot 6,008 + 5,950 \cdot 3,079) \cdot 0,9 = 48,6609 \text{ m}^2 \quad (7-107)$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{\text{In}} = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{sy}} = 942,8 - 313,2 = 629,6 \text{ °C} \quad (7-108)$$

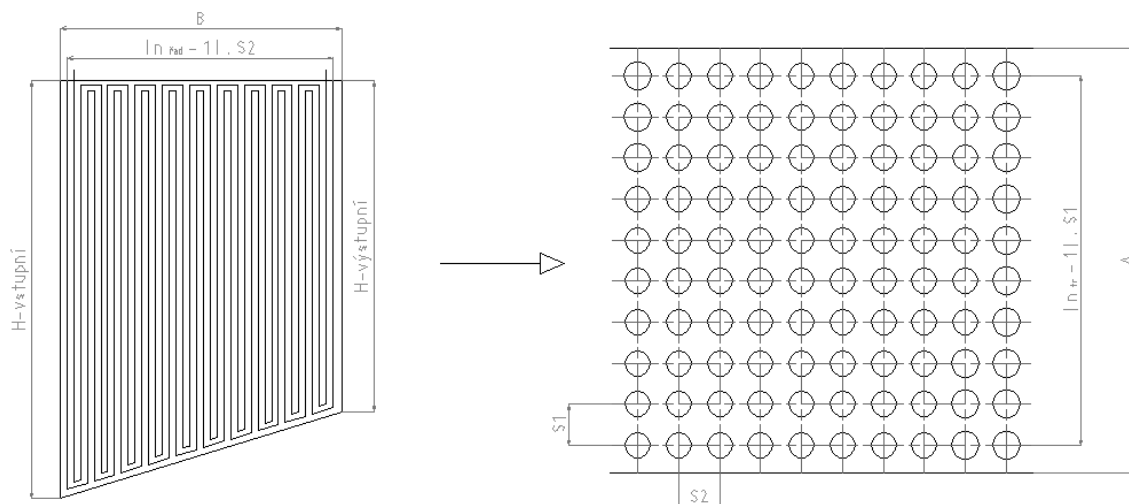
**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_b^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{In}} = 48,6609 \cdot 24,2199 \cdot 629,6 = 742,0227 \text{ kW} \quad (7-109)$$

### 7.3 Přejhřívák SH4

Přejhřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou ve dvojradu v souproutém zapojení. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami.

#### 7.3.1 Návrh geometrie



Obrázek 32: Geometrie přehříváku SH4

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0056 = 0,0268 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 170 \text{ mm} = 0,17 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Vstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{vst}} = 5960 \text{ mm} = 5,960 \text{ m}$$

Výstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{výst}} = 5200 \text{ mm} = 5,200 \text{ m}$$

Střední výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{stř}} = \frac{H_{\text{vst}} + H_{\text{výst}}}{2} = \frac{5960 + 5200}{2} = 5,580 \text{ m} \quad (7-110)$$

Šířka spalínového kanálu:

$$A = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

Délka spalínového kanálu:

$$B = 1700 \text{ mm} = 1,700 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 83: Parametry média přehříváku SH4

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	461,6	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	520	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,03227	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03673	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 84: Parametry spalin přehříváku SH4 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	852,9	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	767,1	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,03227 + 0,03673}{2} = 0,0345 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-111)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{461,3 + 520}{2} = 490,8 \text{ °C} \quad (7-112)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{852,9 + 767,1}{2} = 810 \text{ °C} \quad (7-113)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{490,8 + 810}{2} = 650,4 \text{ °C} \quad (7-114)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 22,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot 55,5556 \cdot 0,0345}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 22,5} = 151,0097 \Rightarrow \text{zvoleno } 152 \text{ trubek} \quad (7-115)$$

- jelikož jsou trubky zapojené v dvojhadu volím počet trubek v řadě  $n_{tr}^{řad} = 76 \text{ trubek}$

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot 55,5556 \cdot 0,0345}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 152} = 22,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-116)$$

**Vstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{řad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 13,020 \cdot 5,96 - (76 \cdot 5,96 \cdot 0,038) = 60,3867 \text{ m}^2 \quad (7-117)$$

**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 13,020 \cdot 5,2 - (76 \cdot 5,2 \cdot 0,038) = 52,6864 \text{ m}^2 \quad (7-118)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (60,3867 \cdot 52,6864)}{60,3867 + 52,6864} = 56,2744 \text{ m}^2 \quad (7-119)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (7-120)$$

$$V_{\text{sp}} = 5,5818 \cdot \frac{810 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,25} \cdot 10,5782$$

$$V_{\text{sp}} = 234,7179 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{234,7179}{56,2744} = 4,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-121)$$

**7.3.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (7-122)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5186}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 85: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH4 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0914	W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	1,34 · 10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,599	[-]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-123)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,5141 \cdot \frac{0,0914}{0,038} \cdot \left( \frac{4,17 \cdot 0,038}{1,34 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,599^{0,33} = 61,1262 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 4,4737 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,6316}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,5141 \quad (7-124)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,4737 \quad (7-125) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316 \quad (7-126)$$

**7.3.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 86: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH4 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$76,5 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$283 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$9,764 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	0,966	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-127)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0835 \cdot \frac{76,5 \cdot 10^{-3}}{0,0268} \cdot \left( \frac{22,35 \cdot 0,0268}{9,764 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,966^{0,4}$$

$$\alpha_p = 2994,3453 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{812,35 + 273,15}{651,5 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0835 \quad (7-128)$$

**7.3.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (7-129)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2013 \cdot (810 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{688,2 + 273,15}{810 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{688,2 + 273,15}{810 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 44,2824 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH4**

$$S_{\text{SH4}} = 690 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH4}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (7-130)$$

$$t_z = 490,8 + \left(0,0158 + \frac{1}{2994,3453}\right) \cdot \frac{8444,4512}{690} \cdot 10^3 = 688,2 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1\right) = 0,4784 \text{ m} \quad (7-131)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-132)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-133)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-134)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,4784}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{810 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 4,5334 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-135)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-136)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(810 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,1657 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-137)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (4,5334 + 0,1657) \cdot 0,1 \cdot 0,4784 = 0,2248 \quad (7-138)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2248} = 0,2013 \quad (7-139)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 61,1262 + 44,2824 = 105,4086 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-140)$$

kde:

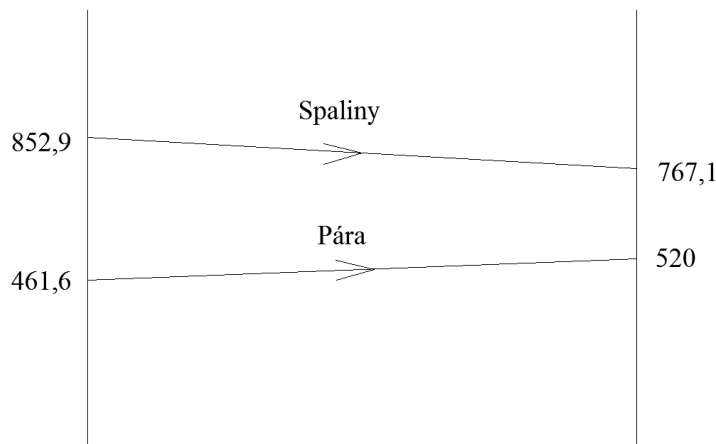
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_c} = \frac{105,4086}{1 + \left( 0,0158 + \frac{1}{2994,3453} \right) \cdot 105,4086} = 39,0307 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-141)$$

### 7.3.5 Tepelný výkon přehříváku SH4

#### Střední teplotní spád



Obrázek 33: Teplotní spád SH4

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(767,1 - 520) - (852,9 - 461,6)}{\ln\left(\frac{767,1 - 520}{852,9 - 461,6}\right)} = 313,7 \text{ °C} \quad (7-142)$$

#### Plocha přehříváku SH4

$$S_{\text{SH4}} = \frac{Q_{\text{SH4}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{8444,4512}{39,0307 \cdot 313,7} = 689,6847 \text{ m}^2 \quad (7-143)$$

#### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 76 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,0268}{2} \cdot 5,58 = 43,1661 \text{ m}^2 \quad (7-144)$$

#### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH4}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{689,6847}{43,1661} = 15,9775 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (7-145)$$

#### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH4}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 16 \cdot 43,1661 = 690,6576 \text{ m}^2 \quad (7-146)$$

#### Délka přehříváku SH4

$$L_{\text{SH4}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,1 = 1,5 \text{ m} \quad (7-147)$$

#### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{SH4}} = S_{\text{SH4}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 690,6576 \cdot 39,0307 \cdot 313,7 = 8456,3637 \text{ kW} \quad (7-148)$$

#### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{SH4}} - Q_{\text{SH4}}}{Q_b^{\text{SH4}}} = \frac{8456,3637 - 8444,4512}{8456,3637} = 0,141 \% \quad (7-149)$$



### 7.3.6 Výpočet výkonu paralelních ploch

#### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet řad:} \quad n_{\text{rad}}^{\text{par}} = 20$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

#### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot H_{\text{stř}} - n_{\text{rad}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}2}}{4}}{2 \cdot (A + H_{\text{stř}}) + n_{\text{rad}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 13,020 \cdot 5,58 - 20 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (13,020 + 5,58) + 20 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 7,0885 \text{ m} \quad (7-150)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{u_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_s^{0,4} \quad (7-151)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,0914}{7,0885} \cdot \left( \frac{4,17 \cdot 7,0885}{1,34 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,599^{0,4} = 4,5495 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 44,2824 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-152)$$

#### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (7-153)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 4,5495 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 44,2824 \right) = 41,4298 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

#### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}}} = \frac{41,4298}{1 + 41,4298 \cdot 0,004} = 35,5401 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-154)$$

kde:

$\varepsilon^{\text{par}}$  – součinitel zanesení [1] [m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>]

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = S^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}} = [L_{\text{SH4}} \cdot (A + 2 \cdot H_{\text{stř}}) + A \cdot (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 \cdot \cos \alpha] \cdot x^{\text{par}} \quad (7-155)$$

$$S_{\text{SAL}}^{\text{par}} = [1,75 \cdot (13,020 + 2 \cdot 5,58) + 13,020 \cdot (16 - 1) \cdot 0,1 \cdot \cos 37] \cdot 0,9 = 52,1211 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t_{\text{ln}} = t_{\text{stř}}^{\text{sp}} - t^{\text{syt}} = 810 - 313,2 = 496,8 \text{ °C} \quad (7-156)$$

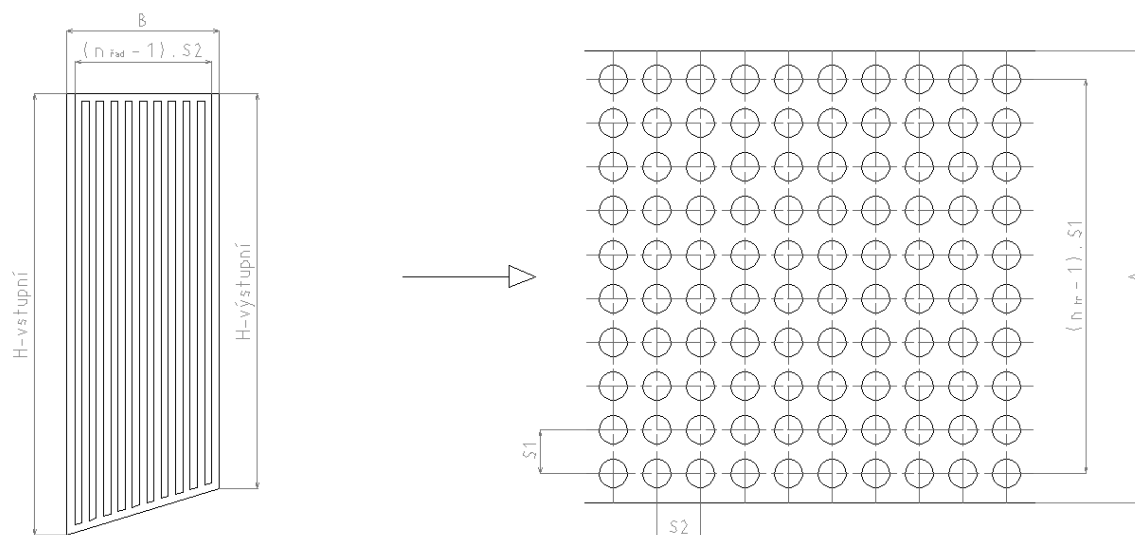
**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_{\text{b}}^{\text{par}} = S_{\text{SAL}}^{\text{par}} \cdot k^{\text{par}} \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 52,1211 \cdot 35,5401 \cdot 496,8 = 920,2670 \text{ kW} \quad (7-157)$$

## 7.4 Přehřívák SH2

Přehřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Stěny tahu jsou tvořeny paralelními plochami a spalínovou mříží.

### 7.4.1 Návrh geometrie



Obrázek 34: Geometrie přehříváku SH2

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,005 = 0,028 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Vstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{vst}} = 4830 \text{ mm} = 4,83 \text{ m}$$

Výstupní výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{výst}} = 4400 \text{ mm} = 4,40 \text{ m}$$

Střední výška spalínového kanálu:

$$H_{\text{stř}} = \frac{H_{\text{vst}} + H_{\text{výst}}}{2} = \frac{4830 + 4400}{2} = 4.615 \text{ m} \quad (7-158)$$

Šířka spalínového kanálu:

$$A = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

Délka spalínového kanálu:

$$B = 1010 \text{ mm} = 1,010 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 87: Parametry média přehříváku SH2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	404,4	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	468,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02784	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,03254	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 88: Parametry spalin přehříváku SH2 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	767,1	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	675,5	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02784 + 0,03254}{2} = 0,03019 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-159)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{404,4 + 468,2}{2} = 436,3 \text{ °C} \quad (7-160)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{767,1 + 675,5}{2} = 721,3 \text{ °C} \quad (7-161)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{436,3 + 721,3}{2} = 578,8 \text{ °C} \quad (7-162)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 16,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,03019}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 16,5} = 151,86 \quad (7-163)$$

=> zvoleno 152 trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,03019}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 152} = 16,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-164)$$

**Vstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{řad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 13,020 \cdot 4,83 - (152 \cdot 4,83 \cdot 0,038) = 34,9885 \text{ m}^2 \quad (7-165)$$

**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{řad}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 13,020 \cdot 4,40 - (152 \cdot 4,40 \cdot 0,038) = 31,8736 \text{ m}^2 \quad (7-166)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (34,9885 \cdot 31,8736)}{34,9885 + 31,8736} = 33,3585 \text{ m}^2 \quad (7-167)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{b}}}{p_{\text{b}} - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (7-168)$$

$$V_{\text{sp}} = 5,5818 \cdot \frac{721,3 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,25} \cdot 10,5782$$

$$V_{\text{sp}} = 215,4967 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{\text{sp}}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_{\text{b}}$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{\text{sp}}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{215,4967}{33,3585} = 6,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-169)$$

**7.4.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (7-170)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 89: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH2 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_{\text{s}}$	0,0838	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_{\text{s}}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$\text{Pr}_{\text{s}}$	0,607	$[-]$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-171)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0997 \cdot \frac{0,0838}{0,038} \cdot \left( \frac{6,46 \cdot 0,038}{1,16 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,607^{0,33} = 59,6801 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,6316}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,0997 \quad (7-172)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (7-173) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316 \quad (7-174)$$

**7.4.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 90: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$70,65 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$258,31 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot \nu_{stř}$	$7,798 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,023	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-175)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0804 \cdot \frac{70,65 \cdot 10^{-3}}{0,028} \cdot \left( \frac{16,48 \cdot 0,028}{7,798 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,023^{0,4}$$

$$\alpha_p = 2623,7488 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}} \right)^{0,5} = \left( \frac{721,3 + 273,15}{578,8 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0804 \quad (7-176)$$

**7.4.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (7-177)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1492 \cdot (721,3 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{574,9 + 273,15}{721,3 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{574,9 + 273,15}{721,3 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 24,0886 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH2**

$$S_{\text{SH2}} = 727 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH2}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (7-178)$$

$$t_z = 436,3 + \left(0,011 + \frac{1}{2623,7488}\right) \cdot \frac{8851,6080}{727} \cdot 10^3 = 574,9 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$	– součinitel zanesení [1]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
---------------	---------------------------	---

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1\right) = 0,2221 \text{ m} \quad (7-179)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-180)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-181)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-182)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,2221}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{721,3 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,1008 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-183)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-184)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(721,3 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,1754 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-185)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (7,1008 + 0,1754) \cdot 0,1 \cdot 0,2221 = 0,1616 \quad (7-186)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1616} = 0,1492 \quad (7-187)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 59,6801 + 24,0886 = 83,7687 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-188)$$

kde:

$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

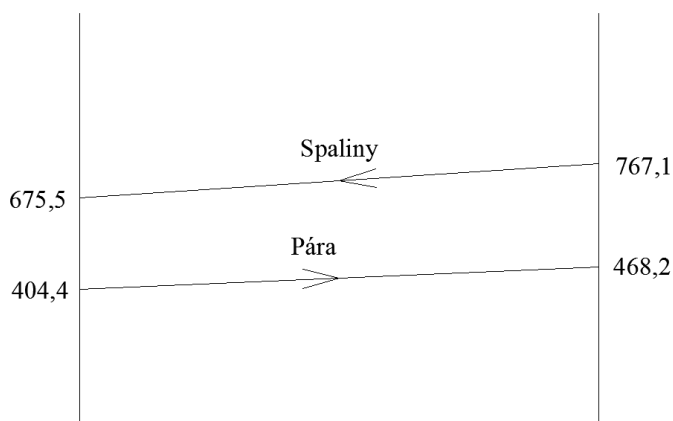
**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_c} = \frac{83,7687}{1 + \left( 0,011 + \frac{1}{2624,9640} \right) \cdot 83,7687} = 42,8842 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-189)$$



## 7.4.5 Tepelný výkon přehříváku SH2

### Střední teplotní spád



Obrázek 35: Teplotní spád SH2

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(675,5 - 404,4) - (767,1 - 468,2)}{\ln\left(\frac{675,5 - 404,4}{767,1 - 468,2}\right)} = 284,8 \text{ °C} \quad (7-190)$$

### Plocha přehříváku SH2

$$S_{\text{SH2}} = \frac{Q_{\text{SH2}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} = \frac{8851,6080}{42,8842 \cdot 284,8} = 724,7444 \text{ m}^2 \quad (7-191)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 152 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,028}{2} \cdot 4,615 = 72,7242 \text{ m}^2 \quad (7-192)$$

### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH2}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{724,7444}{72,7242} = 9,9656 \Rightarrow 10 \text{ řad} \quad (7-193)$$

### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH2}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 10 \cdot 72,7242 = 727,2420 \text{ m}^2 \quad (7-194)$$

### Tepelný výkon

$$Q_{\text{b}}^{\text{SH2}} = S_{\text{SH2}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}} = 727,2420 \cdot 42,8842 \cdot 284,8 = 8882,1121 \text{ kW} \quad (7-195)$$

### Kontrola

$$\frac{Q_{\text{b}}^{\text{SH2}} - Q_{\text{SH2}}}{Q_{\text{b}}^{\text{SH2}}} = \frac{8882,1121 - 8851,6080}{8882,1121} = 0,343 \% \quad (7-196)$$

## 7.4.6 Výpočet výkonu paralelních ploch

### 7.4.6.1 Výkon paralelních ploch výparníkových trubek

#### Návrh geometrie paralelních ploch

$$\text{Vnější průměr trubky:} \quad D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$$

$$\text{Počet řad:} \quad n_{\text{řad}}^{\text{par}} = 11$$

$$\text{Příčná rozteč:} \quad s_1^{\text{par}} = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$$

$$\text{Podélná rozteč:} \quad s_2^{\text{par}} = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

#### Ekvivalentní průměr šotového prostoru

$$d_e = \frac{4 \cdot A \cdot H_{\text{stř}} - n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot \frac{D^{\text{par}2}}{4}}{2 \cdot (A + H_{\text{stř}}) + n_{\text{tr}}^{\text{par}} \cdot \pi \cdot D^{\text{par}}} = \frac{4 \cdot 13,020 \cdot 4,615 - 11 \cdot \pi \cdot \frac{0,0603^2}{4}}{2 \cdot (13,020 + 4,615) + 11 \cdot \pi \cdot 0,0603} = 6,4336 \text{ m} \quad (7-197)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné obtékání trubek

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (7-198)$$

$$\alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} = 0,023 \cdot \frac{0,0838}{6,4336} \cdot \left( \frac{6,46 \cdot 6,4336}{1,16 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,607^{0,4} = 6,8105 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} = \alpha_{\text{sal}} = 24,0886 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-199)$$

#### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s^{\text{par}} = \xi^{\text{par}} \cdot \left( \alpha_{\text{kpod}}^{\text{par}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{\text{par}}}{2 \cdot s_2^{\text{par}} \cdot x^{\text{par}}} + \alpha_{\text{sal}}^{\text{par}} \right) \quad (7-200)$$

$$\alpha_s^{\text{par}} = 0,83 \cdot \left( 6,8105 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0603}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,9} + 24,0886 \right) = 26,9924 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$\xi^{\text{par}}$  – součinitel využití [1] [–]

$x^{\text{par}}$  – součinitel úhlového osálení [1] [–]

#### Součinitel prostupu tepla pro podélné proudění

$$k^{\text{par}} = \frac{\alpha_s^{\text{par}}}{1 + \alpha_s^{\text{par}} \cdot \varepsilon^{\text{par}}} = \frac{26,9924}{1 + 26,9924 \cdot 0,004} = 24,3621 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-201)$$

kde:

$\varepsilon^{\text{par}}$  – součinitel zanesení [1] [m<sup>2</sup> · K · W<sup>-1</sup>]

**Velikost sálavé plochy**

$$S_{SAL}^{par} = S^{par} \cdot x^{par} = [L_{SH4} \cdot (A + 2 \cdot H_{stř}) + A \cdot (n_{řad} - 1) \cdot s_2 \cdot \cos \alpha] \cdot x^{par} \quad (7-202)$$

$$S_{SAL}^{par} = [1,05 \cdot (13,020 + 2 \cdot 4,615) + 13,020 \cdot (10 - 1) \cdot 0,1 \cdot \cos 37] \cdot 0,9 = 29,4488 \text{ m}^2$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t = t_{stř}^{sp} - t^{sy} = 721,3 - 313,2 = 408,1 \text{ °C} \quad (7-203)$$

**Tepelný výkon paralelních ploch**

$$Q_b^{par} = S_{SAL}^{par} \cdot k^{par} \cdot \Delta t_{ln} = 29,4488 \cdot 24,3621 \cdot 408,1 = 292,7851 \text{ kW} \quad (7-204)$$

### 7.4.6.2 Výpočet paralelní plochy mříže

#### Návrh geometrie mříže

Vnější průměr trubky:	$D^{\text{par}} = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d^{\text{par}} = D^{\text{par}} - 2 \cdot s = 0,0603 - 2 \cdot 0,005 = 0,0503 \text{ m}$
Rozteč na šířku:	$s_1^{\text{mř}} = 170 \text{ mm} = 0,17 \text{ m}$
Rozteč na délku:	$s_2^{\text{mř}} = 75 \text{ mm} = 0,075 \text{ m}$
Šířka mříže:	$B = 13020 \text{ mm} = 13,020 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_{\text{tr}}^{\text{mř}} = 76$
Počet řad:	$n_{\text{řad}}^{\text{mř}} = 2$

#### Parametry spalin

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{\text{in}}^{\text{sp}}$	675,5	°C	Teplota na výstupu	$t_{\text{out}}^{\text{sp}}$	662,4	°C

Střední teplota spalin: 
$$t_{\text{str}}^{\text{sp}} = \frac{t_{\text{in}}^{\text{sp}} + t_{\text{out}}^{\text{sp}}}{2} = \frac{675,5 + 662,4}{2} = 668,95^\circ\text{C} \quad (7-205)$$

#### Výška rozvolnění mříže

- uvažují rychlost spalin  $w_{\text{sp}}^{\text{mř}} = 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$H^{\text{mř}} = \frac{V_{\text{sp}}}{w_{\text{sp}}^{\text{mř}} \cdot (B - n_{\text{tr}}^{\text{mř}} \cdot D^{\text{par}})} = \frac{215,4967}{7 \cdot (13,020 - 76 \cdot 0,0603)} = 3,6488 \text{ m} \quad (7-206)$$

=> zvoleno  $H^{\text{mř}} = 3,650 \text{ m}$

#### Průtočný průřez spalin

$$F_{\text{sp}}^{\text{mř}} = B \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{mř}} \cdot H^{\text{mř}} \cdot D^{\text{par}}) = 13,020 \cdot 4,4 - (76 \cdot 3,650 \cdot 0,0603) = 40,5608 \text{ m}^2 \quad (7-207)$$

#### Skutečná rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{sp}}^{\text{mř}}} = \frac{215,4967}{40,5608} = 5,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-208)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí – příčné obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou**

Tabulka 91: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v mříži pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0793	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$1,062 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,613	[-]

$$\alpha_k^{mř} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D^{par}} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D^{par}}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-209)$$

$$\alpha_k^{mř} = 0,2 \cdot 0,91 \cdot 0,7659 \cdot \frac{0,0793}{0,0603} \cdot \left( \frac{5,31 \cdot 0,0603}{1,062 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,613^{0,33} = 28,4838 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

**Korekční součinitel na počet řad**

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{řad}^{mř} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (2 - 2) = 0,91 \quad (7-210)$$

**Korekční součinitel na uspořádání svazku**

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,8192 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,2438}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,7659 \quad (7-211)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1^{mř}}{D} = \frac{0,17}{0,0603} = 2,8192 \quad (7-212) \quad \sigma_2 = \frac{s_2^{mř}}{D} = \frac{0,075}{0,0603} = 1,2438 \quad (7-213)$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (7-214)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,68 + 1}{2} \cdot 0,1391 \cdot (668,95 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{393,2 + 273,15}{668,95 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{393,2 + 273,15}{668,95 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 14,2644 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[-]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[-]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (7,9704 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,1880 = 0,1498 \quad (7-215)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1498} = 0,1392 \quad (7-216)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-217)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,1880}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{668,95 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,9704 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D^{par} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^{par2}} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,075}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,1880 \text{ m} \quad (7-218)$$

**Teplota povrchu trubek mříže**

$$t_z = t^{syt} + \Delta t = 313,2 + 80 = 393,2 \text{ °C} \quad (7-219)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k^{mř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 28,4838 + 14,2644 = 41,7482 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-220)$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon_z \cdot \alpha_c} = \frac{41,7482}{1 + 0,004 \cdot 41,7482} = 34,6741 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-221)$$

**Plocha mříže**

$$S^{mř} = \pi \cdot D^{par} \cdot H \cdot n_{tr}^{mř} \cdot n_{rad}^{mř} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 3,65 \cdot 76 \cdot 2 = 105,1002 \text{ m}^2 \quad (7-222)$$

**Teplotní spád**

$$\Delta t = t_{stř}^{sp} - t^{syt} = 668,95 - 313,2 = 355,75 \text{ °C} \quad (7-223)$$

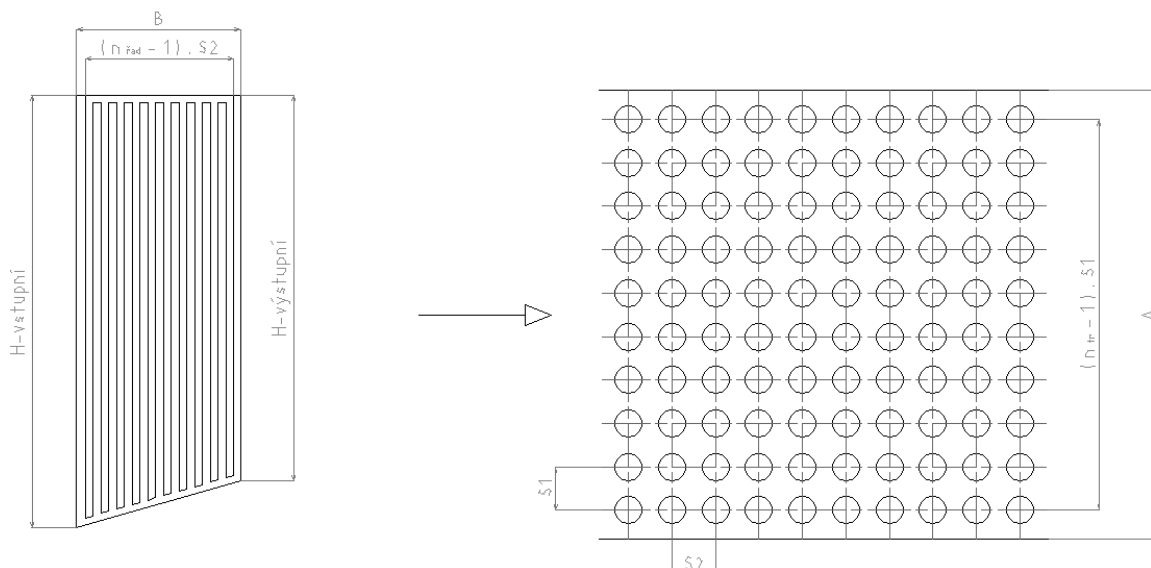
**Tepelný výkon mříže**

$$Q_b^{mř} = S^{mř} \cdot k \cdot \Delta t_{ln} = 105,1002 \cdot 34,6741 \cdot 355,75 = 1296,4463 \text{ kW} \quad (7-224)$$

## 7.5 Přejhřívák SH1B

Přejhřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 7.5.1 Návrh geometrie



Obrázek 36: Geometrie přehříváku SH1B

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 4,5 \text{ mm} = 0,0045 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0045 = 0,029 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 90 \text{ mm} = 0,09 \text{ m}$$

#### Geometrie spalinového kanálu

Vstupní výška spalinového kanálu:

$$H_{vst} = 3810 \text{ mm} = 3,810 \text{ m}$$

Výstupní výška spalinového kanálu:

$$H_{výst} = 3720 \text{ mm} = 3,720 \text{ m}$$

Střední výška spalinového kanálu:

$$H_{stř} = \frac{H_{vst} + H_{výst}}{2} = \frac{3810 + 3720}{2} = 3,765 \text{ m} \quad (7-225)$$

Šířka spalinového kanálu:

$$A = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 92: Parametry média přehříváku SH1B

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	371,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	404,4	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,02467	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,02785	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 93: Parametry spalin přehříváku SH1B pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	662,4	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	603	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,02467 + 0,02785}{2} = 0,02626 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-226)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{371,2 + 404,4}{2} = 387,8 \text{ °C} \quad (7-227)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{662,4 + 603}{2} = 632,7 \text{ °C} \quad (7-228)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{387,8 + 632,7}{2} = 510,25 \text{ °C} \quad (7-229)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02626}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 22} = 92,35 \quad (7-230)$$

=> zvoleno 93 trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02626}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 21,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-231)$$

**Vstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{vst}^{sp} = A \cdot H_{vst} - (n_{tr}^{řad} \cdot H_{vst} \cdot D) = 8 \cdot 3,810 - (93 \cdot 3,810 \cdot 0,038) = 17,0155 \text{ m}^2 \quad (7-232)$$



**Výstupní průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{výst}}^{\text{sp}} = A \cdot H_{\text{výst}} - (n_{\text{tr}}^{\text{rad}} \cdot H_{\text{výst}} \cdot D) = 8 \cdot 3,720 - (93 \cdot 3,720 \cdot 0,038) = 16,6135 \text{ m}^2 \quad (7-233)$$

**Střední průtočný průřez spalin**

$$F_{\text{stř}}^{\text{sp}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{vst}}^{\text{sp}} \cdot F_{\text{výst}}^{\text{sp}})}{F_{\text{vst}}^{\text{sp}} + F_{\text{výst}}^{\text{sp}}} = \frac{2 \cdot (17,0155 \cdot 16,6135)}{17,0155 + 16,6135} = 16,8121 \text{ m}^2 \quad (7-234)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{\text{sp}} = O_{\text{sp}} \cdot \frac{t_{\text{stř}}^{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{b}}}{p_{\text{b}} - \Delta p_{\text{sp}}} \cdot M_{\text{pv}} \quad (7-235)$$

$$V_{\text{sp}} = 5,5818 \cdot \frac{632,7 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,35} \cdot 10,5782$$

$$V_{\text{sp}} = 196,4916 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{\text{sp}}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_{\text{b}}$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{\text{sp}}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{stř}}^{\text{sp}}} = \frac{196,4916}{16,8121} = 11,69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-236)$$

**7.5.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{\text{sp min}}^{\text{s}}}{O_{\text{sp}}} \quad (7-237)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 94: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1B pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_{\text{s}}$	0,0762	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_{\text{s}}$	$0,996 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$\text{Pr}_{\text{s}}$	0,616	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-238)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0187 \cdot \frac{0,0762}{0,038} \cdot \left( \frac{11,69 \cdot 0,038}{0,996 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,616^{0,33} = 82,0124 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,3684}{2} \right)^3 \right]^2} = 1,0187 \quad (7-239)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (7-240) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,3684 \quad (7-241)$$

**7.5.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry**

Tabulka 95: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1B pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$67,82 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$236,39 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot v_{stř}$	$6,207 \cdot 10^7$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,167	[–]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-242)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0753 \cdot \frac{67,82 \cdot 10^{-3}}{0,029} \cdot \left( \frac{21,84 \cdot 0,029}{6,207 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,167^{0,4}$$

$$\alpha_p = 3945,1246 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{632,7 + 273,15}{510,25 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0753 \quad (7-243)$$

**7.5.4 Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (7-244)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1478 \cdot (632,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{477,8 + 273,15}{632,7 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{477,8 + 273,15}{632,7 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 17,3921 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH1B**

$$S_{\text{SH1B}} = 369 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{par}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{\text{SH1B}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (7-245)$$

$$t_z = 387,8 + \left(0,0056 + \frac{1}{3945,1246}\right) \cdot \frac{5672,7216}{369} \cdot 10^3 = 477,8 \text{ °C}$$

kde:

$\varepsilon$	– součinitel zanesení [1]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
---------------	---------------------------	---

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1\right) = 0,1965 \text{ m} \quad (7-246)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{\text{sp}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-247)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-248)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-249)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,1965}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{632,7 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,9526 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-250)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-251)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(632,7 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,1867 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-252)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (7,9526 + 0,1867) \cdot 0,1 \cdot 0,1965 = 0,1599 \quad (7-253)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1599} = 0,1478 \quad (7-254)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 82,0124 + 17,3921 = 99,4045 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-255)$$

kde:

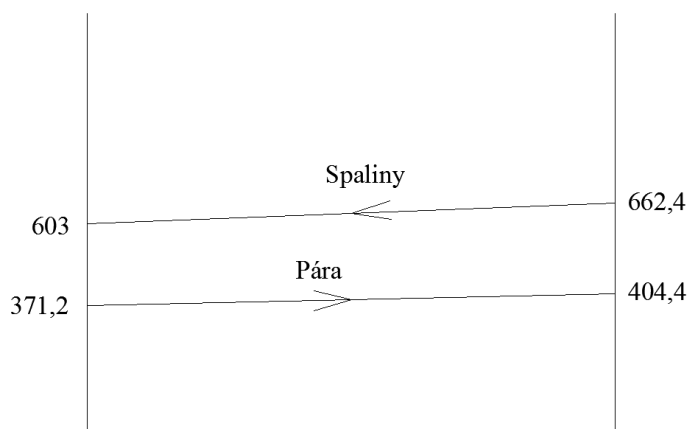
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left( \varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_c} = \frac{99,4045}{1 + \left( 0,0056 + \frac{1}{3945,1246} \right) \cdot 99,4045} = 62,8402 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-256)$$

## 7.5.5 Tepelný výkon přehříváku SH1B

### Střední teplotní spád



Obrázek 37: Teplotní spád SH1B

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(603 - 371,2) - (662,4 - 404,4)}{\ln\left(\frac{603 - 371,2}{662,4 - 404,4}\right)} = 244,7 \text{ °C} \quad (7-257)$$

### Plocha přehříváku SH1B

$$S_{\text{SH1B}} = \frac{Q_{\text{SH1B}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{5672,7216}{62,8402 \cdot 244,7} = 368,9096 \text{ m}^2 \quad (7-258)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot H_{\text{stř}} = 93 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,029}{2} \cdot 3,765 = 36,8504 \text{ m}^2 \quad (7-259)$$

### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH1B}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{368,9096}{36,8504} = 10,0101 \Rightarrow 10 \text{ řad} \quad (7-260)$$

### Skutečná plocha přehříváku

$$S_{\text{SH1B}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 10 \cdot 36,8504 = 368,5040 \text{ m}^2 \quad (7-261)$$

### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{SH1B}} = S_{\text{SH1B}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 368,5040 \cdot 62,8402 \cdot 244,7 = 5666,4849 \text{ kW} \quad (7-262)$$

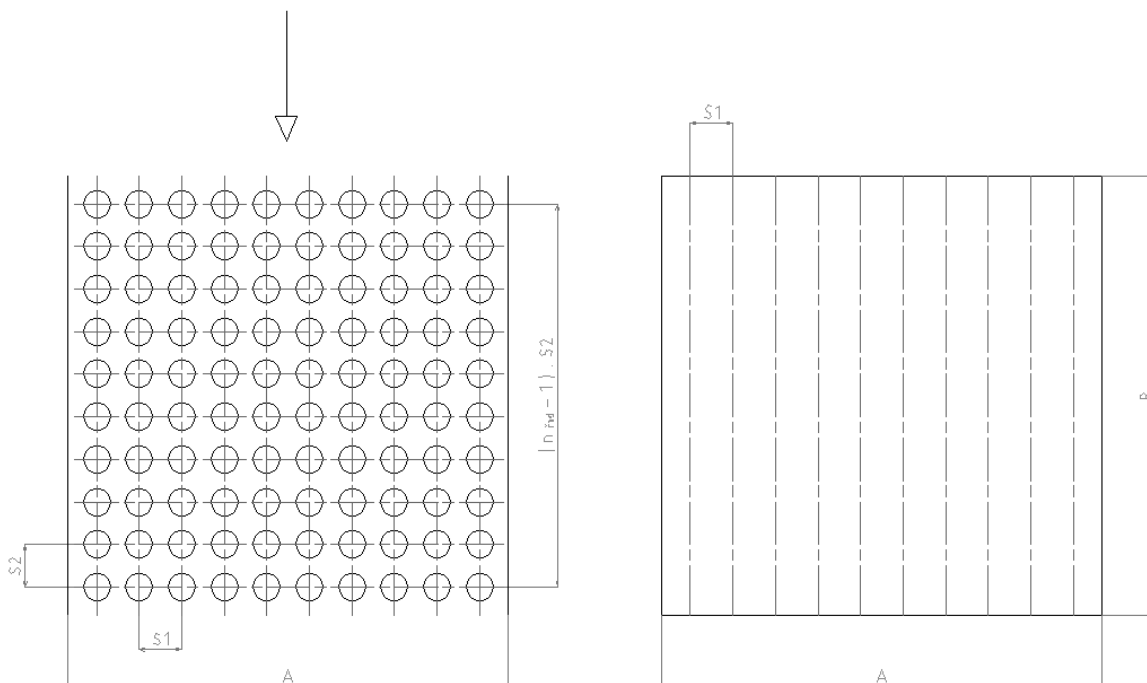
### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{SH1B}} - Q_{\text{SH1B}}}{Q_b^{\text{SH1B}}} = \frac{5666,4849 - 5672,7216}{5666,4849} = -0,110 \% \quad (7-263)$$

## 7.6 Přejhřívák SH1A

Přejhřívák je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 7.6.1 Návrh geometrie



Obrázek 38: Geometrie přehříváku SH1A

#### Návrh geometrie přehříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 38 \text{ mm} = 0,038 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 4,5 \text{ mm} = 0,0045 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,038 - 2 \cdot 0,0045 = 0,029 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 85 \text{ mm} = 0,085 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

#### Geometrie spalinového kanálu

Délka spalinového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalinového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 96: Parametry média přehříváku SH1A

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{par}$	313,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{par}$	371,2	°C
Měrný objem	$v_{in}^{par}$	0,01739	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{par}$	0,02467	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 97: Parametry spalin přehříváku SH1A pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	603	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	444	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{par} + v_{out}^{par}}{2} = \frac{0,01739 + 0,02467}{2} = 0,02103 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-264)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{par} = \frac{t_{in}^{par} + t_{out}^{par}}{2} = \frac{313,2 + 371,2}{2} = 342,2 \text{ °C} \quad (7-265)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{603 + 444}{2} = 523,5 \text{ °C} \quad (7-266)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{par} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{342,2 + 523,5}{2} = 432,85 \text{ °C} \quad (7-267)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost páry  $w_{par} = 17,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{par}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02103}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 17,6} = 92,45 \quad (7-268)$$

=> zvoleno 93 trubek

**Korigovaná rychlost páry**

$$w_{par} = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} = \frac{4 \cdot (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,02103}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 17,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-269)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{řad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (93 \cdot 3,650 \cdot 0,038) = 16,3009 \text{ m}^2 \quad (7-270)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-271)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{523,5 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,45} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 172,9758 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin[m<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup>] $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{172,9758}{16,3009} = 10,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-272)$$

**7.6.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \min} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \min}^s}{O_{sp}} \quad (7-273)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 98: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1A pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,067	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,8036 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,627	[-]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-274)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0004 \cdot \frac{0,067}{0,038} \cdot \left( \frac{10,71 \cdot 0,038}{0,8036 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,627^{0,33} = 77,3641 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$



kde:

### Korekční součinitele na straně spalín

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,1053}{2}\right)^3\right]^2} = 1,0004 \quad (7-275)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,2368 \quad (7-276) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,038} = 2,1053 \quad (7-277)$$

### 7.6.3 Součinitele přestupu tepla na straně páry

Tabulka 99: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1A pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_p$	$68,8 \cdot 10^{-3}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_p$	$216 \cdot 10^{-7}$	$Pa \cdot s^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_p = \eta_p \cdot v_{stř}$	$4,545 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_p$	1,384	[-]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_{par} \cdot d}{\nu_p}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-278)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0622 \cdot \frac{68,8 \cdot 10^{-3}}{0,029} \cdot \left(\frac{17,49 \cdot 0,029}{4,54 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,384^{0,4} = 4545,9051 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left(\frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}}\right)^{0,5} = \left(\frac{523,5 + 273,15}{432,85 + 273,15}\right)^{0,5} = 1,0622 \quad (7-279)$$

### 7.6.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{stř} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (7-280)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1464 \cdot (523,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{405 + 273,15}{523,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{405 + 273,15}{523,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 12,1234 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

kde:

$a_{stř}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalin při teplotě spalin	[–]
$T_{stř}^{sp}$	– střední teplota spalin	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalin	[K]

**Odhadnutá plocha SH1A**

$$S_{SH1A} = 1428 \text{ m}^2$$

**Teplota povrchu nánosů na straně spalin**

$$t_z = t_{stř}^{par} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH1A}}{S_{sál}} \cdot 10^3 \quad (7-281)$$

$$t_z = 342,2 + \left( 0,0059 + \frac{1}{4545,9051} \right) \cdot \frac{14662,19}{1428} \cdot 10^3 = 405 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,08}{0,038^2} - 1 \right) = 0,1709 \text{ m} \quad (7-282)$$

**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-283)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-284)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-285)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,1709}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{523,5 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 9,0600 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-286)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-287)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(523,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,2034 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-288)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (9,0600 + 0,2034) \cdot 0,1 \cdot 0,1709 = 0,1583 \quad (7-289)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1583} = 0,1464 \quad (7-290)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

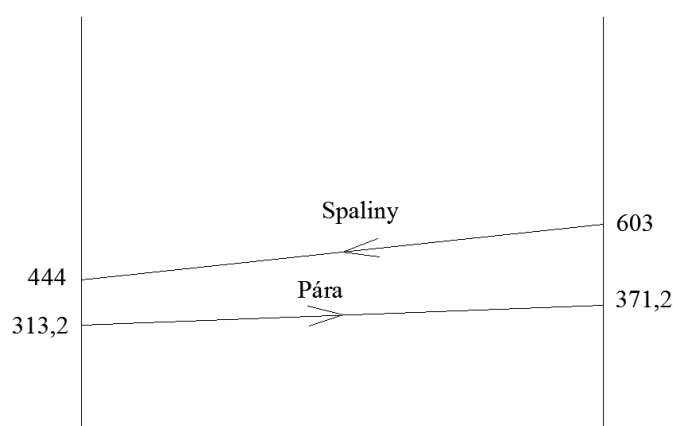
$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 77,3641 + 12,1234 = 89,4875 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-291)$$

kde:

$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \left(\varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_c} = \frac{89,4875}{1 + \left(0,0059 + \frac{1}{4545,9051}\right) \cdot 89,4875} = 57,8710 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-292)$$

**7.6.5 Tepelný výkon přehříváku SH1A****Střední teplotní spád**

Obrázek 39: Teplotní spád SH1A

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{par}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{par}}}\right)} = \frac{(444 - 313,2) - (603 - 371,2)}{\ln\left(\frac{444 - 313,2}{603 - 371,2}\right)} = 176,5 \text{ °C} \quad (7-293)$$

**Plocha přehříváku SH1A**

$$S_{\text{SH1A}} = \frac{Q_{\text{SH1A}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{14662,9632}{57,8710 \cdot 176,5} = 1435,5425 \text{ m}^2 \quad (7-294)$$

**Plocha jedné řady trubek**

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 93 \cdot \pi \cdot \frac{0,038 + 0,029}{2} \cdot 3,65 = 35,7249 \text{ m}^2 \quad (7-295)$$

**Počet řad**

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{SH1A}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{1435,5425}{35,7249} = 40,1832 \Rightarrow 40 \text{ řad} \quad (7-296)$$

**Skutečná plocha přehříváku**

$$S_{\text{SH1A}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 40 \cdot 35,7249 = 1428,9960 \text{ m}^2 \quad (7-297)$$

**Výška SH1A**

$$H_{\text{SH1A}} = n_{\text{řad}} \cdot s_2 = 40 \cdot 0,08 = 3,2 \text{ m} \quad (7-298)$$

**Počet částí**

- pro maximální výšku přehříváku  $H_{\text{max}} = 1,65 \text{ m}$

$$n_{\text{část}} = \frac{H_{\text{SH1A}}}{H_{\text{max}}} = \frac{3,2}{1,65} = 1,9393 \Rightarrow 2 \text{ části} \quad (7-299)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_{\text{b}}^{\text{SH1A}} = S_{\text{SH1A}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 1428,9960 \cdot 57,8710 \cdot 176,5 = 14596,0960 \text{ kW} \quad (7-300)$$

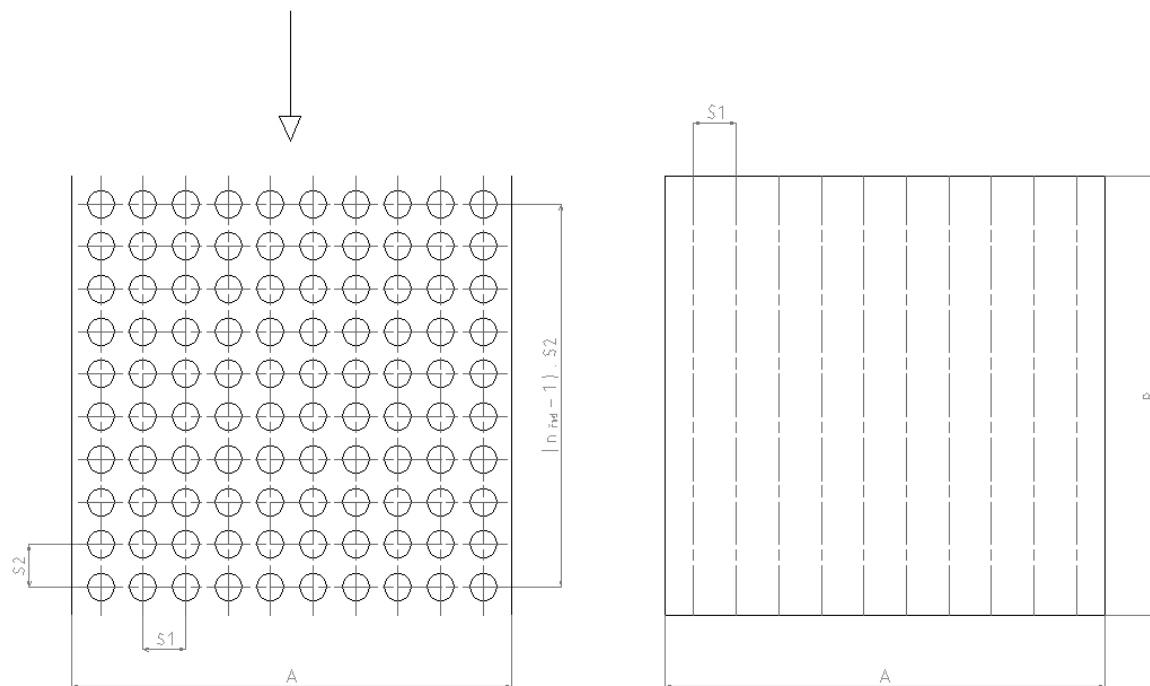
**Kontrola**

$$\frac{Q_{\text{b}}^{\text{SH1A}} - Q_{\text{SH1A}}}{Q_{\text{b}}^{\text{SH1A}}} = \frac{14596,0960 - 14662,9632}{14596,0960} = -0,458 \% \quad (7-301)$$

## 7.7 Ekonomizér EKO3

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 7.7.1 Návrh geometrie



Obrázek 40: Geometrie ekonomizéru 3

#### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:

$$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 100: Parametry média ekonomizéru 3

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	169	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	200	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00111	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00115	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 101: Parametry spalin ekonomizéru 3 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	444	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	365,7	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00111 + 0,00115}{2} = 0,00113 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-302)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{169 + 200}{2} = 184,5 \text{ °C} \quad (7-303)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{444 + 365,7}{2} = 404,85 \text{ °C} \quad (7-304)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{184,5 + 404,85}{2} = 294,675 \text{ °C} \quad (7-305)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 1,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (7-306)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00113}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 1,23} = 98,25 \Rightarrow \text{zvoleno 99 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (7-307)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00113}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 93} = 1,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Průtočný průřez spalín**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{rad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (99 \cdot 3,650 \cdot 0,032) = 17,6368 \text{ m}^2 \quad (7-308)$$

**Skutečný průtok spalín**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-309)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{404,85 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,7} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 147,5793 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$	– skutečné množství spalín	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_b$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{sp}$	– podtlak spalín	$[\text{kPa}]$

**Rychlost spalín**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{147,5793}{17,6368} = 8,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-310)$$

**7.7.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalín****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (7-311)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 102: Látkové vlastnosti spalín pro střední teplotu v EKO3 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalín	$\lambda_s$	0,0570	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalín	$\nu_s$	$0,611 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalín	$Pr_s$	0,639	$[-]$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7-312)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0656 \cdot \frac{0,0570}{0,032} \cdot \left( \frac{8,57 \cdot 0,032}{0,611 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,639^{0,33} = 77,4502 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

### Korekční součinitele na straně spalín

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2}\right)^3\right]^2} = 1,0656 \quad (7-313)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (7-314) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (7-315)$$

### 7.7.3 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{stř}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{stř}}^{\text{sp}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}} \quad (7-316)$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1667 \cdot (404,85 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{259 + 273,15}{404,85 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{259 + 273,15}{404,85 + 273,15}}$$

$$\alpha_{\text{sál}} = 7,6878 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$a_{\text{stř}}$	– stupeň černosti povrchu stěn [1]	[–]
$a$	– stupeň černosti spalín při teplotě spalín	[–]
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	– střední teplota spalín	[K]
$T_z$	– teplota povrchu nánosů na straně spalín	[K]

### Odhadnutá plocha EKO3

$$S_{\text{EKO3}} = 565 \text{ m}^2$$

### Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{\text{stř}}^{\text{voda}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{EKO3}}}{S_{\text{sál}}} \cdot 10^3 \quad (7-317)$$

$$t_z = 184,5 + 0,006 \cdot \frac{7019,9822}{565} \cdot 10^3 = 259 \text{ °C}$$

kde:

$$\varepsilon \quad \text{– součinitel zanesení [1]} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1\right) = 0,2004 \text{ m} \quad (7-318)$$



**Podíl tříatomových plynů**

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1291 + 0,1519 = 0,2810 \quad (7-319)$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,2810 = 0,02810 \text{ MPa} \quad (7-320)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (7-321)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1519}{3,16 \cdot \sqrt{0,02810 \cdot 0,2004}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{404,85 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2810$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 8,8714 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Hmotnost spalin**

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz \min} \quad (7-322)$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,35 \cdot 3,5869 = 7,3041 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu_{pk} = \frac{[A^r \cdot (x_{\dot{u}} + 1)]}{2 \cdot G_s} = \frac{[0,02 \cdot (0,65 + 1)]}{2 \cdot 7,3041} = 0,002259 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-323)$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř}^{sp} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002259}{\sqrt[3]{(404,85 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 0,2264 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (7-324)$$

**Optická hustota spalin**

$$k = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p_{sp} \cdot s = (8,8714 + 0,2264) \cdot 0,1 \cdot 0,2004 = 0,1823 \quad (7-325)$$

**Stupeň černosti spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,1823} = 0,1667 \quad (7-326)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{kpř} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 77,4502 + 7,6878 = 85,1380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-327)$$

kde:

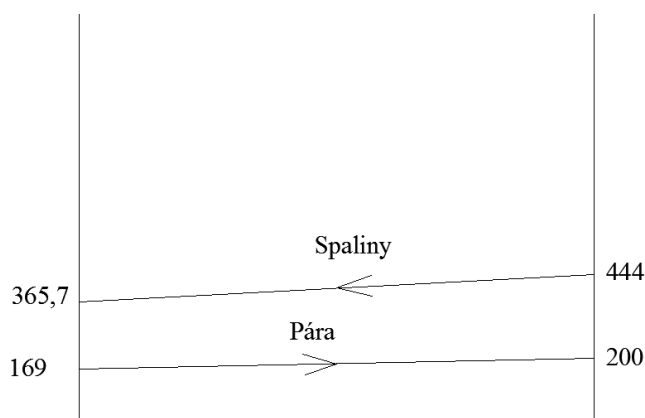
$\omega$  – součinitel omývání plochy [1] [-]

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon_z \cdot \alpha_c} = \frac{85,1380}{1 + 0,006 \cdot 85,1380} = 56,3519 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-328)$$

## 7.7.4 Tepelný výkon přehříváku EKO3

### Střední teplotní spád



Obrázek 41: Teplotní spád EKO3

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}}}\right)} = \frac{(365,7 - 169) - (444 - 200)}{\ln\left(\frac{365,7 - 169}{444 - 200}\right)} = 219,5 \text{ °C} \quad (7-329)$$

### Plocha přehříváku EKO3

$$S_{\text{EKO3}} = \frac{Q_{\text{EKO3}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{7019,9822}{56,3519 \cdot 219,5} = 567,5354 \text{ m}^2 \quad (7-330)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řad}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 99 \cdot \pi \cdot \frac{0,032 + 0,0248}{2} \cdot 8 = 70,6632 \text{ m}^2 \quad (7-331)$$

### Počet řad

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO3}}}{S_{\text{řad}}} = \frac{567,5354}{70,6632} = 8,0315 \Rightarrow 8 \text{ řad} \quad (7-332)$$

### Výška ekonomizéru

$$H_{\text{EKO3}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (8 - 1) \cdot 0,08 = 0,56 \text{ m} \quad (7-333)$$

### Skutečná plocha ekonomizéru

$$S_{\text{EKO3}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řad}} = 8 \cdot 70,6632 = 565,3056 \text{ m}^2 \quad (7-334)$$

### Tepelný výkon

$$Q_{\text{b}}^{\text{EKO3}} = S_{\text{EKO3}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 565,3056 \cdot 56,3519 \cdot 219,5 = 6992,4018 \text{ kW} \quad (7-335)$$

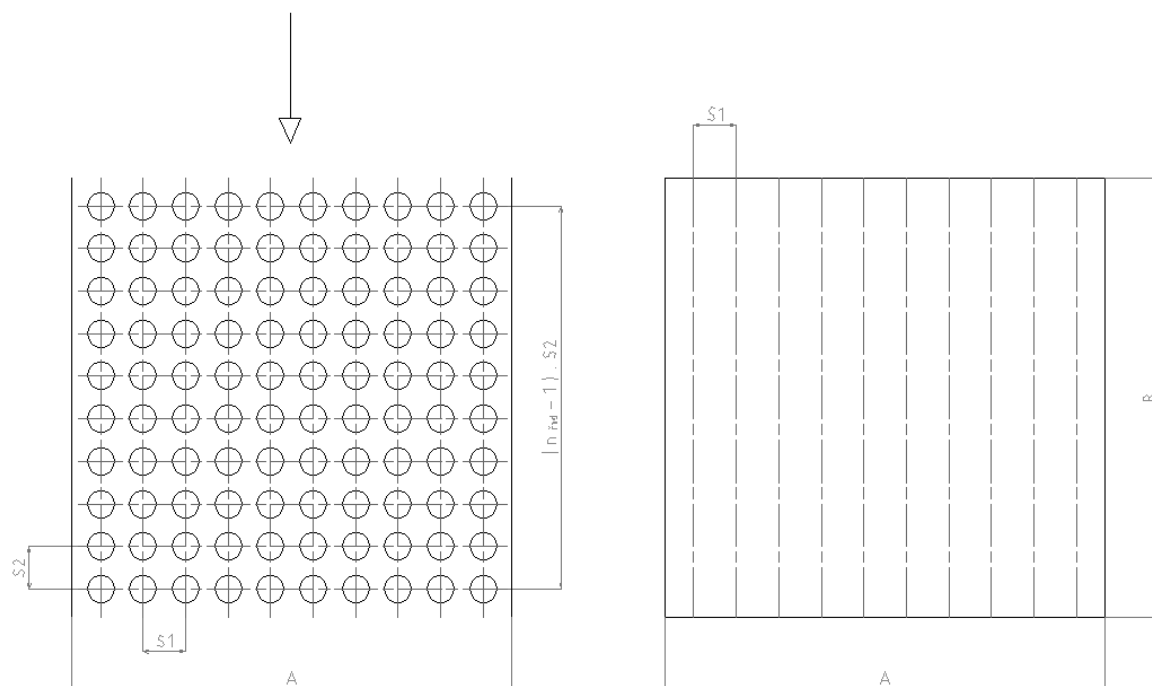
### Kontrola

$$\frac{Q_{\text{b}}^{\text{EKO3}} - Q_{\text{EKO3}}}{Q_{\text{b}}^{\text{EKO3}}} = \frac{6992,4018 - 7019,9822}{6992,4018} = -0,394 \% \quad (7-336)$$

## 7.8 Ohřívák vzduchu AH2

Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 7.8.1 Návrh geometrie



Obrázek 42: Geometrie ohříváku vzduchu AH2

#### Návrh geometrie ohříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0025 = 0,0395 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 95 \text{ mm} = 0,095 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 68 \text{ mm} = 0,068 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 8000 \text{ mm} = 8 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 103: Parametry média ohříváku vzduchu AH2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{vzd}$	150	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{vzd}$	240	°C

**Parametry spalin**

Tabulka 104: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH2 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	365,7	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	301,5	°C

**Střední hodnoty**

Střední teplota média: 
$$t_{stř}^{vzd} = \frac{t_{in}^{vzd} + t_{out}^{vzd}}{2} = \frac{150 + 240}{2} = 195 \text{ °C} \quad (7-337)$$

Střední teplota spalin: 
$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{365,7 + 301,5}{2} = 333,6 \text{ °C} \quad (7-338)$$

Střední teplota stěny: 
$$t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{vzd} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{195 + 333,6}{2} = 264,3 \text{ °C} \quad (7-339)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-340)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{333,6 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 0,7} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 132,0704 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

$O_{sp}$	– skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$p_b$	– barometrický tlak	$[\text{MPa}]$
$\Delta p_{sp}$	– podtlak spalin	$[\text{kPa}]$

**Skutečný průtok vzduchu v AH2**

$$V_{vzd} = O_{vz \min} \cdot \beta \cdot \frac{t_{stř}^{vzd} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b + \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-341)$$

$$V_{vzd} = 3,5869 \cdot 1,25 \cdot \frac{195 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 + 2,5} \cdot 10,5782$$

$$V_{vzd} = 79,3304 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

**Počet paralelních trubek**

- zvolená rychlost vzduchu  $w_{vzd} = 11,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{vzd}} = \frac{4 \cdot 79,3304}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 11,35} = 5703,74 \Rightarrow \text{zvoleno } 5712 \text{ trubek} \quad (7-342)$$

**Korigovaná rychlost vzduchu**

$$w_{vzd} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot 79,3304}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 5712} = 11,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-343)$$

**Počet trubek jedné řady**

$$n_{tr}^{řad} = \frac{B}{s_1} = \frac{8}{0,095} = 84,21 \Rightarrow \text{zvoleno } 84 \text{ trubek} \quad (7-344)$$

**Počet řad**

$$n_{řad} = \frac{n_{tr}}{n_{tr}^{řad}} = \frac{5712}{84} = 68 \text{ řad} \quad (7-345)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{řad} \cdot A \cdot D) = 3,650 \cdot 8 - (84 \cdot 3,650 \cdot 0,0445) = 15,5563 \text{ m}^2 \quad (7-346)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{132,0704}{15,5563} = 8,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-347)$$

**7.8.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (7-348)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 105: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH2 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0510	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,505 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,646	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (7-349)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9675 \cdot \frac{0,0510}{0,0445} \cdot \left( \frac{8,49 \cdot 0,0445}{0,505 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,646^{0,33} = 63,2925 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,1348 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,5281}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,9675 \quad (7-350)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,1348 \quad (7-351) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,5281 \quad (7-352)$$

**7.8.3 Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu**

Tabulka 106: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH2 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{vzd}$	$38,6 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{vzd}$	$342 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_{vzd}$	0,69	[-]

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vzd} \cdot d}{u_{vzd}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-353)$$

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0625 \cdot \frac{38,6 \cdot 10^{-3}}{0,0395} \cdot \left( \frac{11,33 \cdot 0,0395}{342 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} = 40,4601 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}^{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{333,6 + 273,15}{264,3 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0625 \quad (7-354)$$

### 7.8.4 Součinitel prostupu tepla

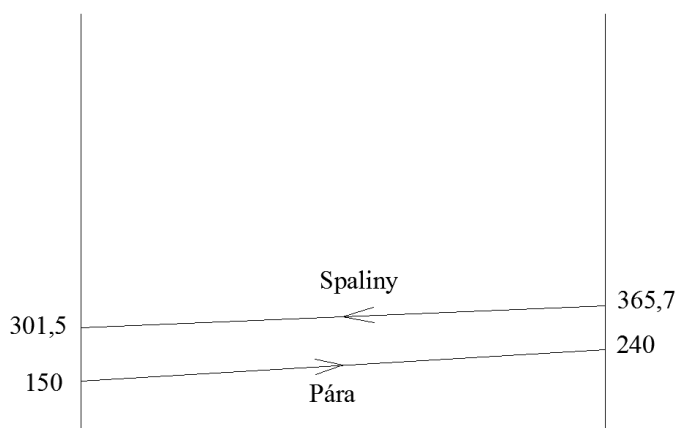
$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{k,př} \cdot \alpha_{vzd}}{\alpha_{k,př} + \alpha_{vzd}} = 0,72 \cdot \frac{63,2925 \cdot 40,4601}{63,2925 + 40,4601} = 17,7710 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-355)$$

kde:

$\xi$  – součinitel využití plochy [3] [-]

### 7.8.5 Tepelný výkon AH2

#### Střední teplotní spád



Obrázek 43: Teplotní spád AH2

$$\Delta t_{in} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left( \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(t_{out}^{sp} - t_{in}^{vzd}) - (t_{in}^{sp} - t_{out}^{vzd})}{\ln \left( \frac{t_{out}^{sp} - t_{in}^{vzd}}{t_{in}^{sp} - t_{out}^{vzd}} \right)} = \frac{(301,5 - 150) - (365,7 - 240)}{\ln \left( \frac{301,5 - 150}{365,7 - 240} \right)} = 138,2 \text{ °C} \quad (7-356)$$

#### Rozdíly teplot

$$\text{Menší rozdíl teplot} \quad \Delta t_m = t_{in}^{sp} - t_{out}^{sp} = 365,7 - 301,5 = 64,2 \text{ °C} \quad (7-357)$$

$$\text{Větší rozdíl teplot} \quad \Delta t_v = t_{out}^{vzd} - t_{in}^{vzd} = 240 - 150 = 90 \text{ °C} \quad (7-358)$$

#### Parametry P a R

- dle těchto parametrů bude následně určen korekční součinitel

$$P = \frac{\Delta t_m}{t_{in}^{sp} - t_{in}^{vzd}} = \frac{64,2}{365,7 - 150} = 0,2976 \quad (7-359)$$

$$R = \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = \frac{90}{64,2} = 1,4019 \quad (7-360)$$

**Korigovaný teplotní spád**

$$\Delta t_k = \Delta t_{ln} \cdot \psi = 138,2 \cdot 0,84 = 116,088 \text{ °C} \quad (7-361)$$

kde:

$$\psi \quad - \text{ korekční součinitel [1]} \quad [-]$$

**Plocha ohříváku AH2**

$$S_{AH2} = \frac{Q_{AH2}}{k \cdot \Delta t_k} = \frac{5670,8420}{17,7710 \cdot 116,088} = 2748,8330 \text{ m}^2 \quad (7-362)$$

**Plocha jedné části**

$$S_{část} = n_{tr} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 5712 \cdot \pi \cdot \frac{0,0445 + 0,0395}{2} \cdot 3,650 = 2750,9344 \text{ m}^2 \quad (7-363)$$

**Počet částí**

$$n_{část} = \frac{S_{AH2}}{S_{část}} = \frac{2748,8330}{2750,9344} = 0,9992 \Rightarrow 1 \text{ část} \quad (7-364)$$

**Skutečná plocha AH2**

$$S_{AH2}^{skut} = n_{část} \cdot S_{část} = 1 \cdot 2750,9344 = 2750,9344 \quad (7-365)$$

**Tepelný výkon**

$$Q_b^{AH2} = S_{AH2} \cdot k \cdot \Delta t_k = 2750,9344 \cdot 17,7710 \cdot 116,088 = 5675,1772 \text{ kW} \quad (7-366)$$

**Kontrola**

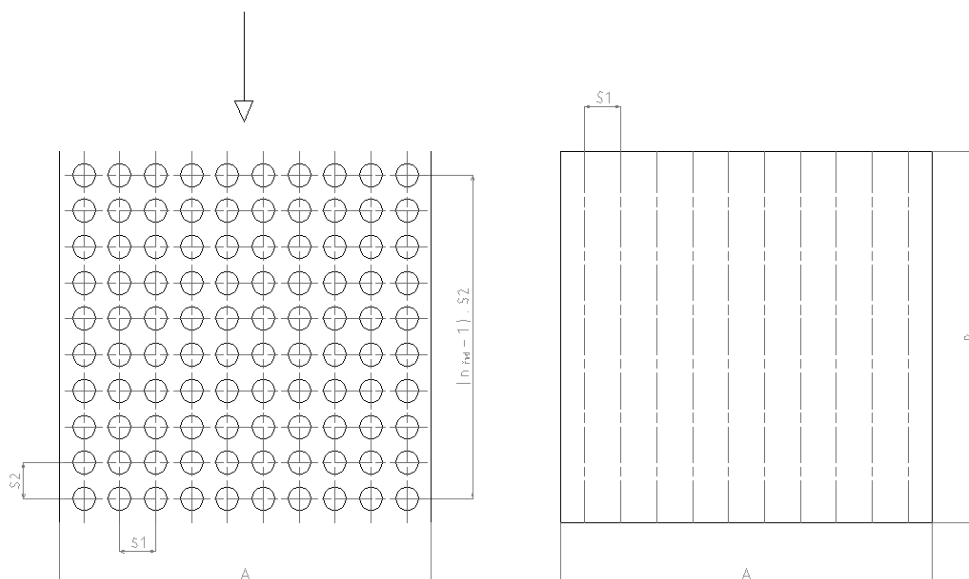
$$\frac{Q_b^{AH2} - Q_{AH2}}{Q_b^{AH2}} = \frac{5675,1772 - 5670,8420}{5675,1772} = 0,076 \% \quad (7-367)$$



## 7.9 Ekonomizér EKO2

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Trubky jsou z důvodu dosažení větší výhřevné plochy žebrovány.

### 7.9.1 Návrh geometrie



Obrázek 44: Geometrie ekonomizéru 2

#### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:	$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$
Příčná rozteč:	$s_1 = 82 \text{ mm} = 0,082 \text{ m}$
Podélná rozteč:	$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$
Tloušťka žeber:	$t_z = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$
Výška žeber:	$h_z = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$
Průměr žeber:	$D_z = 52 \text{ mm} = 0,052 \text{ m}$
Počet žeber na 1 m trubky:	$n_z = 80 \text{ 1/m}$
Rozteč žeber:	$s_z = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$

#### Geometrie spalinového kanálu

Délka spalinového kanálu:	$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$
Šířka spalinového kanálu:	$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$

**Parametry média**

Tabulka 107: Parametry média ekonomizéru 2

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	146	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	169	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00108	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00111	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 108: Parametry spalin ekonomizéru 2 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	301,5	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	242,1	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00108 + 0,00111}{2} = 0,001095 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-368)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{146 + 169}{2} = 157,5 \text{ °C} \quad (7-369)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{301,5 + 242,1}{2} = 271,8 \text{ °C} \quad (7-370)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{157,5 + 271,8}{2} = 214,65 \text{ °C} \quad (7-371)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (7-372)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,001095}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 2,7} = 43,37 \Rightarrow \text{zvoleno 44 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (7-373)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,001095}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} = 2,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Plocha trubek**

$$S_{tr} = n_{tr}^{rad} \cdot D \cdot B + 2 \cdot h_z \cdot t_z \cdot n_z \cdot n_{tr}^{rad} \cdot B \quad (7-374)$$

$$S_{tr} = 44 \cdot 0,032 \cdot 6 + 2 \cdot 0,012 \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 44 \cdot 6$$

$$S_{tr} = 8,9549 \text{ m}^2$$

**Průřez spalin**

$$F_{sp} = A \cdot B - S_{tr} = 6 \cdot 3,650 - 8,9549 = 12,9451 \text{ m}^2 \quad (7-375)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stf}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-376)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{271,8 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,1} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 119,0919 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin  $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ 
 $p_b$  – barometrický tlak  $[\text{MPa}]$ 
 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin  $[\text{kPa}]$ 
**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{119,0919}{12,9451} = 9,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-377)$$

**7.9.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (7-378)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,82411 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 109: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO2 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0458	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,421 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,655	$[-]$

**Korekční součinitele**

$$C_z = 1$$

$$C_s = 1$$

**Výhřevná plocha žebér  $\frac{S_z}{S}$** 

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,0248} - \frac{0,001}{0,0248}\right)} = 0,4176 \quad (7-379)$$

**Výhřevná plocha  $\frac{S_h}{S}$** 

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,4176 = 0,5824 \quad (7-380)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{S_z} \cdot \left(\frac{d}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W_{sp} \cdot S_z}{u_s}\right)^{0,72} \quad (7-381)$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0458}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,012}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{9,20 \cdot 0,0125}{0,421 \cdot 10^{-4}}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 79,6477 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel  $\beta$** 

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 79,6477}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,0187 \cdot 0,85 \cdot 79,6477)}} = 38,6501 \quad (7-382)$$

**Součinitel efektivnosti žebra E**

$$\beta \cdot h_z = 38,6501 \cdot 0,012 = 0,4638 \quad (7-383)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,056}{0,032} = 1,75 \quad (7-384)$$

- těmto hodnotám dle grafu [1] odpovídá  $E \cong 0,9$

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{red} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (7-385)$$

$$\alpha_{red} = (0,4176 \cdot 0,9 \cdot 1 + 0,5824) \cdot \frac{0,85 \cdot 79,6477}{1 + 0,0187 \cdot 0,85 \cdot 79,6477} = 28,7791 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 7.9.3 Součinitel přestupu tepla na straně vody

Tabulka 110: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO2 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{\text{voda}}$	$693 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{\text{voda}}$	$1843 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{\text{voda}} = \eta_{\text{voda}} \cdot \nu_{\text{stř}}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$\text{Pr}_{\text{voda}}$	1,14	[–]

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{\text{voda}}}{d} \cdot \left( \frac{w_{\text{voda}} \cdot d}{\nu_{\text{voda}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{voda}}^{0,4} \quad (7-386)$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0570 \cdot \frac{693 \cdot 10^{-3}}{0,0248} \cdot \left( \frac{2,66 \cdot 0,0248}{2,02 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,14^{0,4}$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 18451,5084 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{T_{\text{stř}}^{\text{st}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{271,8 + 273,15}{214,65 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0570 \quad (7-387)$$

### 7.9.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{red}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{voda}}} \cdot \frac{S_s}{S_v}} = \frac{1}{\frac{1}{28,7791} + \frac{1}{18451,5084} \cdot \frac{0,3720}{0,0779}} = 28,5663 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-388)$$

#### Vnější plocha 1m trubky

$$S_s = \pi \cdot D \cdot l + n_z \cdot (\pi \cdot D_z \cdot t_z) + 2 \cdot n_z \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D^2) \right] - n_z \cdot (\pi \cdot D \cdot t_z) \quad (7-389)$$

$$S_s = \pi \cdot 0,032 \cdot 1 + 80 \cdot (\pi \cdot 0,056 \cdot 0,001) + 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (0,056^2 - 0,032^2) \right] - 80 \cdot (\pi \cdot 0,032 \cdot 0,001)$$

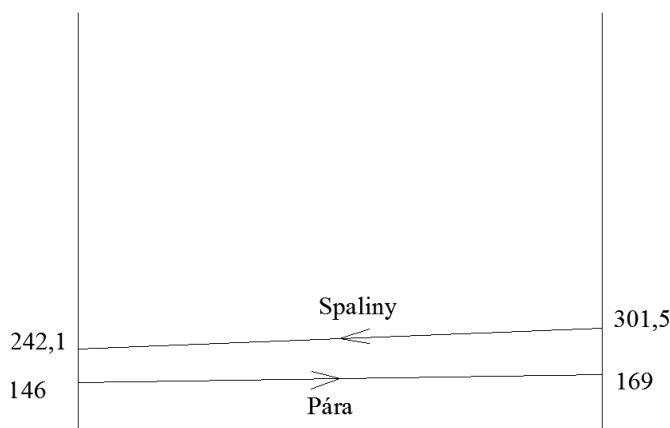
$$S_s = 0,3720 \text{ m}^2$$

#### Vnitřní plocha 1m trubky

$$S_v = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,0248 \cdot 1 = 0,0779 \text{ m}^2 \quad (7-390)$$

## 7.9.5 Tepelný výkon EKO2

### Střední teplotní spád



Obrázek 45: Teplotní spád EKO2

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}}}\right)} = \frac{(242,1 - 146) - (301,5 - 169)}{\ln\left(\frac{242,1 - 146}{301,5 - 169}\right)} = 113,3 \text{ °C} \quad (7-391)$$

### Plocha ohříváku EKO2

$$S_{\text{EKO2}} = \frac{Q_{\text{EKO2}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{5102,5767}{28,5663 \cdot 113,3} = 1576,5423 \text{ m}^2 \quad (7-392)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řada}} = n_{\text{řad}}^{\text{rad}} \cdot B \cdot S_s = 44 \cdot 6 \cdot 0,3720 = 98,2080 \text{ m}^2 \quad (7-393)$$

### Počet řad EKO2

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO2}}}{S_{\text{řada}}} = \frac{1576,5423}{98,2080} = 16,0531 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (7-394)$$

### Skutečná plocha EKO2

$$S_{\text{EKO2}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řada}} = 16 \cdot 98,2080 = 1571,3280 \text{ m}^2 \quad (7-395)$$

### Výška EKO2

$$H_{\text{EKO2}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,08 = 1,2 \text{ m} \quad (7-396)$$

### Tepelný výkon EKO2

$$Q_b^{\text{EKO2}} = S_{\text{EKO2}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 1571,3280 \cdot 28,5663 \cdot 113,3 = 5085,7001 \text{ kW} \quad (7-397)$$

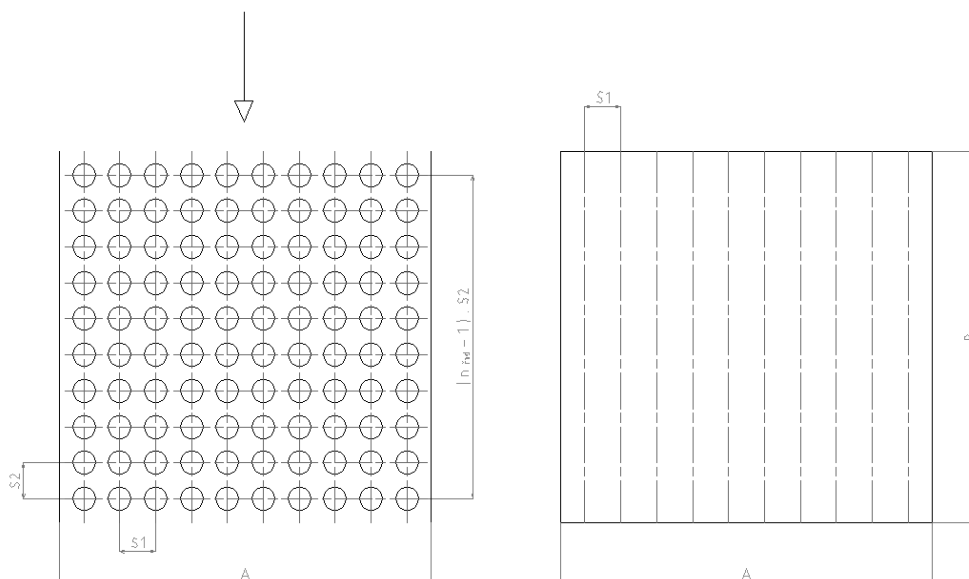
### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{EKO2}} - Q_{\text{EKO2}}}{Q_b^{\text{EKO2}}} = \frac{5085,7001 - 5102,5767}{5085,7001} = -0,332 \text{ \%} \quad (7-398)$$

## 7.10 Ekonomizér EKO1

Ekonomizér je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Trubky jsou z důvodu dosažení větší výhřevné plochy žebrovány.

### 7.10.1 Návrh geometrie



Obrázek 46: Geometrie ekonomizéru 1

### Návrh geometrie ekonomizéru

Vnější průměr trubky:	$D = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$
Tloušťka stěny:	$s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = D - 2 \cdot s = 0,032 - 2 \cdot 0,0036 = 0,0248 \text{ m}$
Příčná rozteč:	$s_1 = 82 \text{ mm} = 0,082 \text{ m}$
Podélná rozteč:	$s_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$
Tloušťka žeber:	$t_z = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$
Výška žeber:	$h_z = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$
Průměr žeber:	$D_z = 52 \text{ mm} = 0,052 \text{ m}$
Počet žeber na 1 m trubky:	$n_z = 80 \text{ 1/m}$
Rozteč žeber:	$s_z = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$

### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:	$A = 3650 \text{ mm} = 3,650 \text{ m}$
Šířka spalínového kanálu:	$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$

**Parametry média**

Tabulka 111: Parametry média ekonomizéru 1

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{voda}$	130	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{voda}$	146	°C
Měrný objem	$v_{in}^{voda}$	0,00106	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem	$v_{out}^{voda}$	0,00108	$m^3 \cdot kg^{-1}$

**Parametry spalin**

Tabulka 112: Parametry spalin ekonomizéru 1 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	242,1	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	201,2	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední měrný objem: } v_{stř} = \frac{v_{in}^{voda} + v_{out}^{voda}}{2} = \frac{0,00106 + 0,00108}{2} = 0,00107 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7-399)$$

$$\text{Střední teplota média: } t_{stř}^{voda} = \frac{t_{in}^{voda} + t_{out}^{voda}}{2} = \frac{130 + 146}{2} = 138 \text{ °C} \quad (7-400)$$

$$\text{Střední teplota spalin: } t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{242,1 + 201,2}{2} = 221,65 \text{ °C} \quad (7-401)$$

$$\text{Střední teplota stěny: } t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{voda} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{138 + 221,65}{2} = 179,825 \text{ °C} \quad (7-402)$$

**Počet trubek v řadě**

- zvolená rychlost vody  $w_{voda} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{voda}} \quad (7-403)$$

$$n_{tr}^{řad} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00107}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 2,7} = 43,39 \Rightarrow \text{zvoleno 44 trubek}$$

**Korigovaná rychlost vody**

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (M_{pp} + M_o - M_{v2} - M_{v1}) \cdot v_{stř}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}^{řad}} \quad (7-404)$$

$$w_{voda} = \frac{4 \cdot (55,5556 + 0,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot 0,00107}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} = 2,60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



**Plocha trubek**

$$S_{tr} = n_{tr}^{rad} \cdot D \cdot B + 2 \cdot h_z \cdot t_z \cdot n_z \cdot n_{tr}^{rad} \cdot B \quad (7-405)$$

$$S_{tr} = 44 \cdot 0,032 \cdot 6 + 2 \cdot 0,012 \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 44 \cdot 6$$

$$S_{tr} = 8,9549 \text{ m}^2$$

**Průřez spalin**

$$F_{sp} = A \cdot B - S_{tr} = 6 \cdot 3,650 - 8,9549 = 12,9451 \text{ m}^2 \quad (7-406)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stf}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-407)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{221,65 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,1} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 108,1322 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin  $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ 
 $p_b$  – barometrický tlak  $[\text{MPa}]$ 
 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin  $[\text{kPa}]$ 
**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{108,1322}{12,9451} = 8,40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-408)$$

**7.10.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (7-409)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 113: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO1 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0416	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,356 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,665	$[-]$

**Korekční součinitele**

$$C_z = 1$$

$$C_s = 1$$

**Výhřevná plocha žebér  $\frac{S_z}{S}$** 

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,032}{0,0248}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,0248} - \frac{0,001}{0,0248}\right)} = 0,4176 \quad (7-410)$$

**Výhřevná plocha  $\frac{S_h}{S}$** 

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,4176 = 0,5824 \quad (7-411)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{S_z} \cdot \left(\frac{d}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot S_z}{u_{sp}}\right)^{0,72} \quad (7-412)$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0416}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,012}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{8,40 \cdot 0,0125}{0,356 \cdot 10^{-4}}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 76,4530 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel  $\beta$** 

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 76,4530}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,021 \cdot 0,85 \cdot 76,4530)}} = 37,0685 \quad (7-413)$$

**Součinitel efektivnosti žebra E**

$$\beta \cdot h_z = 37,0658 \cdot 0,012 = 0,4448 \quad (7-414)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,056}{0,032} = 1,75 \quad (7-415)$$

- těmto hodnotám dle grafu [1] odpovídá  $E \cong 0,9$

**Redukovaný součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_{red} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (7-416)$$

$$\alpha_{red} = (0,4176 \cdot 0,9 \cdot 1 + 0,5824) \cdot \frac{0,85 \cdot 76,4530}{1 + 0,021 \cdot 0,85 \cdot 76,4530} = 26,9988 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 7.10.3 Součinitel přestupu tepla na straně vody

Tabulka 114: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO1 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{\text{voda}}$	$694 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\eta_{\text{voda}}$	$2150 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{\text{voda}} = \eta_{\text{voda}} \cdot \nu_{\text{stř}}$	$2,31 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$\text{Pr}_{\text{voda}}$	1,310	[–]

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot C_1 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{\text{voda}}}{d} \cdot \left( \frac{w_{\text{voda}} \cdot d}{\nu_{\text{voda}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{voda}}^{0,4} \quad (7-417)$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0451 \cdot \frac{694 \cdot 10^{-3}}{0,0248} \cdot \left( \frac{2,60 \cdot 0,0248}{2,31 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,310^{0,4}$$

$$\alpha_{\text{voda}} = 17035,4037 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### Korekční součinitele

$$C_1 = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{\text{stř}}^{\text{sp}}}{T_{\text{stř}}^{\text{st}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{221,65 + 273,15}{179,825 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0451 \quad (7-418)$$

### 7.10.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{red}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{voda}} \cdot \frac{S_s}{S_v}}} = \frac{1}{\frac{1}{26,9988} + \frac{1}{17035,4037 \cdot \frac{0,3720}{0,0779}}} = 26,7960 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-419)$$

#### Vnější plocha 1m trubky

$$S_s = \pi \cdot D \cdot l + n_z \cdot (\pi \cdot D_z \cdot t_z) + 2 \cdot n_z \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D^2) \right] - n_z \cdot (\pi \cdot D \cdot t_z) \quad (7-420)$$

$$S_s = \pi \cdot 0,032 \cdot 1 + 80 \cdot (\pi \cdot 0,056 \cdot 0,001) + 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (0,056^2 - 0,032^2) \right] - 80 \cdot (\pi \cdot 0,032 \cdot 0,001)$$

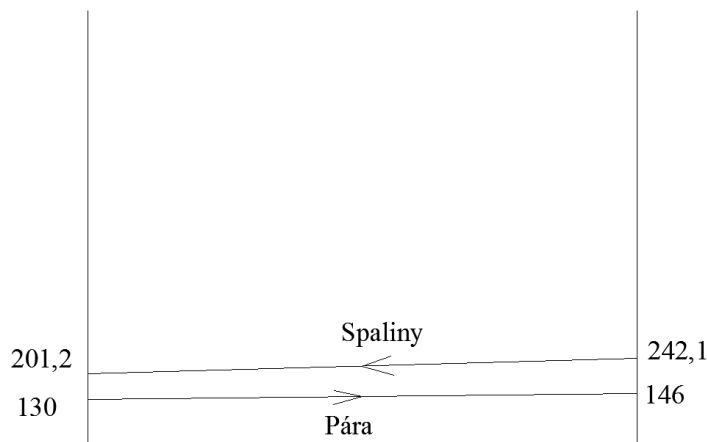
$$S_s = 0,3720 \text{ m}^2$$

#### Vnitřní plocha 1m trubky

$$S_v = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,0248 \cdot 1 = 0,0779 \text{ m}^2 \quad (7-421)$$

### 7.10.5 Tepelný výkon EKO1

#### Střední teplotní spád



Obrázek 47: Teplotní spád EKO1

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{voda}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{voda}}}\right)} = \frac{(201,2 - 130) - (242,1 - 146)}{\ln\left(\frac{201,2 - 130}{242,1 - 146}\right)} = 83,1 \text{ °C} \quad (7-422)$$

#### Plocha ohříváku EKO1

$$S_{\text{EKO1}} = \frac{Q_{\text{EKO1}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{3512,6516}{26,7960 \cdot 83,1} = 1577,4808 \text{ m}^2 \quad (7-423)$$

#### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řada}} = n_{\text{řad}}^{\text{rad}} \cdot B \cdot S_s = 44 \cdot 6 \cdot 0,3720 = 98,2080 \text{ m}^2 \quad (7-424)$$

#### Počet řad EKO1

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{EKO1}}}{S_{\text{řada}}} = \frac{1577,4808}{98,2080} = 16,0626 \Rightarrow 16 \text{ řad} \quad (7-425)$$

#### Skutečná plocha EKO1

$$S_{\text{EKO1}}^{\text{skut}} = n_{\text{řad}} \cdot S_{\text{řada}} = 16 \cdot 98,2080 = 1571,2128 \text{ m}^2 \quad (7-426)$$

#### Výška EKO1

$$H_{\text{EKO1}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (16 - 1) \cdot 0,08 = 1,2 \text{ m} \quad (7-427)$$

#### Tepelný výkon EKO1

$$Q_b^{\text{EKO1}} = S_{\text{EKO1}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 1571,2128 \cdot 26,7960 \cdot 83,1 = 3498,6943 \text{ kW} \quad (7-428)$$

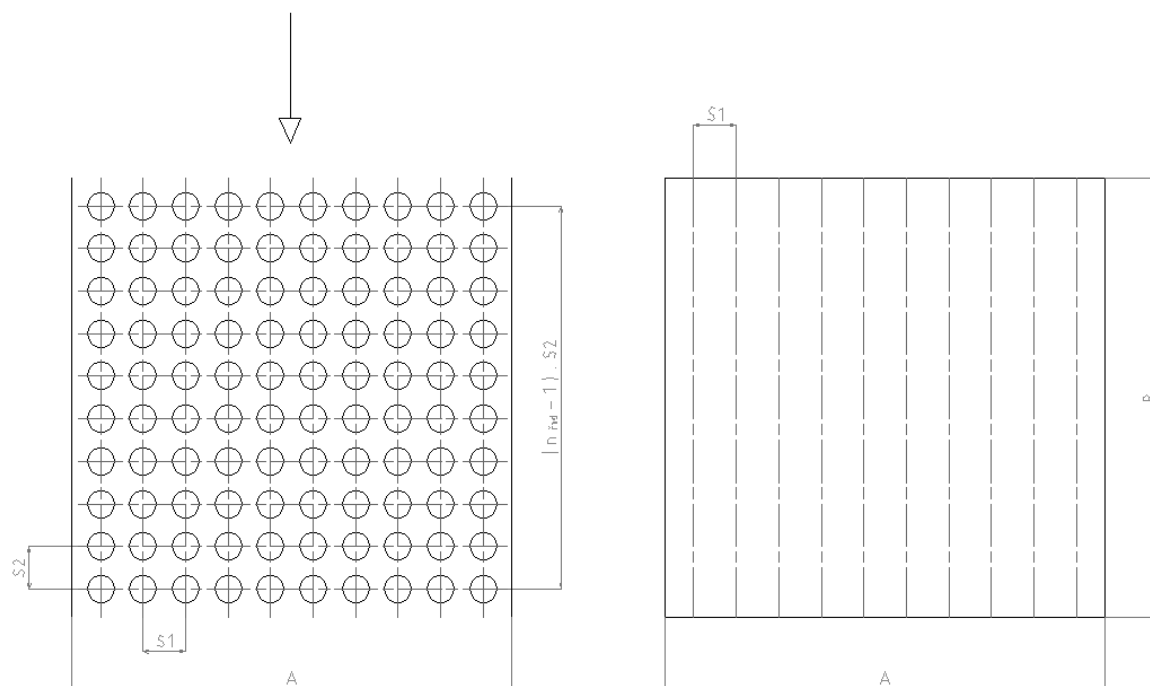
#### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{EKO1}} - Q_{\text{EKO1}}}{Q_b^{\text{EKO1}}} = \frac{3498,6943 - 3512,6516}{3498,6943} = -0,393 \% \quad (7-429)$$

## 7.11 Ohříváku vzduchu AH1

Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení.

### 7.11.1 Návrh geometrie



Obrázek 48: Geometrie ohříváku vzduchu AH1

#### Návrh geometrie ohříváku

Vnější průměr trubky:

$$D = 44,5 \text{ mm} = 0,0445 \text{ m}$$

Tloušťka stěny:

$$s = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubky:

$$d = D - 2 \cdot s = 0,0445 - 2 \cdot 0,0025 = 0,0395 \text{ m}$$

Příčná rozteč:

$$s_1 = 95 \text{ mm} = 0,095 \text{ m}$$

Podélná rozteč:

$$s_2 = 60 \text{ mm} = 0,060 \text{ m}$$

#### Geometrie spalínového kanálu

Délka spalínového kanálu:

$$A = 3500 \text{ mm} = 3,500 \text{ m}$$

Šířka spalínového kanálu:

$$B = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$$

**Parametry média**

Tabulka 115: Parametry média ohříváku vzduchu AH1

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{vzd}$	100	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{vzd}$	150	°C

**Parametry spalin**

Tabulka 116: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH1 pro dřevní štěpku

Vstupní hodnoty				Výstupní hodnoty			
Teplota na vstupu	$t_{in}^{sp}$	201,2	°C	Teplota na výstupu	$t_{out}^{sp}$	160	°C

**Střední hodnoty**

$$\text{Střední teplota média:} \quad t_{stř}^{vzd} = \frac{t_{in}^{vzd} + t_{out}^{vzd}}{2} = \frac{100 + 150}{2} = 125 \text{ °C} \quad (7-430)$$

$$\text{Střední teplota spalin:} \quad t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in}^{sp} + t_{out}^{sp}}{2} = \frac{201,2 + 160}{2} = 180,6 \text{ °C} \quad (7-431)$$

$$\text{Střední teplota stěny:} \quad t_{stř}^{st} = \frac{t_{stř}^{vzd} + t_{stř}^{sp}}{2} = \frac{125 + 180,6}{2} = 152,8 \text{ °C} \quad (7-432)$$

**Skutečný průtok spalin**

$$V_{sp} = O_{sp} \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-433)$$

$$V_{sp} = 5,5818 \cdot \frac{180,6 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 - 1,6} \cdot 10,5782$$

$$V_{sp} = 99,6585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

 $O_{sp}$  – skutečné množství spalin $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  $p_b$  – barometrický tlak

[MPa]

 $\Delta p_{sp}$  – podtlak spalin

[kPa]

**Skutečný průtok vzduchu v AH1**

$$V_{vzd} = O_{vz \min} \cdot \beta \cdot \frac{t_{stř}^{vzd} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_b}{p_b + \Delta p_{sp}} \cdot M_{pv} \quad (7-434)$$

$$V_{vzd} = 3,5869 \cdot 1,25 \cdot \frac{125 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 + 5} \cdot 10,5782$$

$$V_{vzd} = 65,8822 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

**Počet paralelních trubek**

- zvolená rychlost vzduchu  $w_{vzd} = 20,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{vzd}} = \frac{4 \cdot 65,8822}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 20,7} = 2597,25 \Rightarrow \text{zvoleno 2604 trubek} \quad (7-435)$$

**Korigovaná rychlost vzduchu**

$$w_{vzd} = \frac{4 \cdot V_{vzd}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot 65,8822}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 2604} = 20,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-436)$$

**Počet trubek jedné řady**

$$n_{tr}^{rad} = \frac{B}{s_1} = \frac{6}{0,095} = 63,16 \Rightarrow \text{zvoleno 62 trubek} \quad (7-437)$$

**Počet řad**

$$n^{rad} = \frac{n_{tr}}{n_{tr}^{rad}} = \frac{2604}{62} = 42 \text{ řad} \quad (7-438)$$

**Průtočný průřez spalin**

$$F^{sp} = A \cdot B - (n_{tr}^{rad} \cdot A \cdot D) = 3,500 \cdot 6 - (62 \cdot 3,500 \cdot 0,0445) = 11,3435 \text{ m}^2 \quad (7-439)$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F^{sp}} = \frac{99,6585}{11,3435} = 8,79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7-440)$$

**7.11.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin****Poměrný objem vodní páry**

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{sp \text{ min}}^s}{O_{sp}} \quad (7-441)$$

$$O_{H_2O} = \frac{0,8241 + (1,35 - 1) \cdot (1,0194 - 1) \cdot 3,5869}{5,5818} = 0,1519$$

Tabulka 117: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH1 pro dřevní štěpku

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s$	0,0381	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_s$	$0,304 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo spalin	$Pr_s$	0,6739	[–]

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin při příčném obtékání**

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{u_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7-442)$$

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9176 \cdot \frac{0,0381}{0,0445} \cdot \left( \frac{8,79 \cdot 0,0445}{0,304 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6739^{0,33} = 64,0910 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_z = 1$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2} = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,1348 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,3483}{2} \right)^3 \right]^2} = 0,9176 \quad (7-443)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,1348 \quad (7-444) \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,060}{0,0445} = 1,3483 \quad (7-445)$$

**7.11.3 Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu**

Tabulka 118: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu

Součinitel tepelné vodivosti páry	$\lambda_{vzd}$	$33,67 \cdot 10^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel dynamické viskozity páry	$\nu_{vzd}$	$261 \cdot 10^{-7}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
Prandtlovo číslo páry	$Pr_{vzd}$	0,69	[–]

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d} \cdot \left( \frac{w_{vzd} \cdot d}{\nu_{vzd}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7-446)$$

$$\alpha_{vzd} = 0,023 \cdot 1 \cdot 1,0321 \cdot \frac{33,67 \cdot 10^{-3}}{0,0395} \cdot \left( \frac{20,65 \cdot 0,0395}{261 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} = 68,2020 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde:

**Korekční součinitele na straně spalin**

$$C_l = 1$$

$$C_t = \left( \frac{T_{stř}^{sp}}{T_{stř}} \right)^{0,5} = \left( \frac{180,6 + 273,15}{152,8 + 273,15} \right)^{0,5} = 1,0321 \quad (7-447)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{k,př} \cdot \alpha_{vzd}}{\alpha_{k,př} + \alpha_{vzd}} = 0,72 \cdot \frac{64,0910 \cdot 68,2020}{64,0910 + 68,2020} = 23,5280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7-448)$$

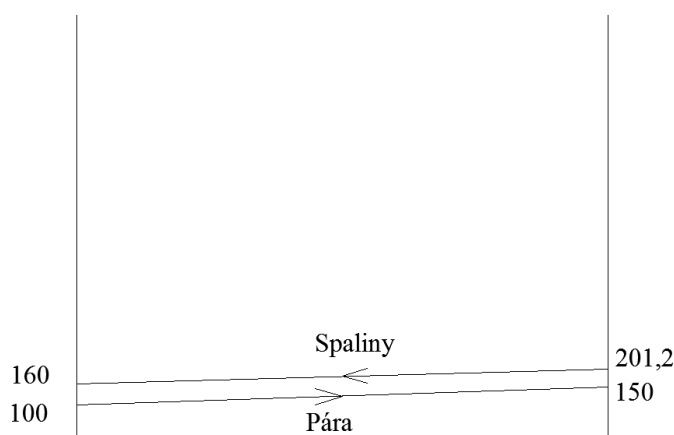
kde:

$$\xi \quad \text{– součinitel využití plochy [3]} \quad [-]$$



### 7.11.4 Tepelný výkon AH1

#### Střední teplotní spád



Obrázek 49: Teplotní spád AH1

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}) - (t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{out}}^{\text{sp}} - t_{\text{in}}^{\text{vzd}}}{t_{\text{in}}^{\text{sp}} - t_{\text{out}}^{\text{vzd}}}\right)} = \frac{(160 - 100) - (201,2 - 150)}{\ln\left(\frac{160 - 100}{201,2 - 150}\right)} = 55,5 \text{ °C} \quad (7-449)$$

#### Plocha ohříváku AH1

$$S_{\text{AH1}} = \frac{Q_{\text{AH1}}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} = \frac{3125,8317}{23,5280 \cdot 55,5} = 2393,7985 \text{ m}^2 \quad (7-450)$$

#### Plocha jedné části

$$S_{\text{část}} = n_{\text{tr}} \cdot \pi \cdot \frac{D + d}{2} \cdot A = 2604 \cdot \pi \cdot \frac{0,0445 + 0,0395}{2} \cdot 3,500 = 1202,5640 \text{ m}^2 \quad (7-451)$$

#### Počet částí

$$n_{\text{část}} = \frac{S_{\text{AH1}}}{S_{\text{část}}} = \frac{2393,7985}{1202,5640} = 1,9906 \Rightarrow 2 \text{ části} \quad (7-452)$$

#### Skutečná plocha ohříváku AH1

$$S_{\text{AH1}}^{\text{skut}} = n_{\text{část}} \cdot S_{\text{část}} = 2 \cdot 1202,5640 = 2405,1280 \text{ m}^2 \quad (7-453)$$

#### Výška jedné části

$$H_{\text{AH1}} = (n_{\text{řad}} - 1) \cdot s_2 = (42 - 1) \cdot 0,06 = 2,460 \text{ m} \quad (7-454)$$

#### Tepelný výkon

$$Q_b^{\text{AH1}} = S_{\text{AH1}}^{\text{skut}} \cdot k \cdot \Delta t_{\ln} = 2405,1280 \cdot 23,5280 \cdot 55,5 = 3140,6257 \text{ kW} \quad (7-455)$$

#### Kontrola

$$\frac{Q_b^{\text{AH1}} - Q_{\text{AH1}}}{Q_b^{\text{AH1}}} = \frac{3140,6257 - 3125,8317}{3140,6257} = 0,471 \text{ \%} \quad (7-456)$$

## 8 Kontroly

### 8.1 Hnědé uhlí

#### 8.1.1 Kontrola výkonu výparníku

##### Výkon na straně média

$$Q_{VYP} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i'' - i_{out}^{EKO3}) + M_o \cdot (i' - i_{out}^{EKO3}) \quad (8-1)$$

$$Q_{VYP} = (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (2719,900 - 856,048) + 0,5556 \cdot (1420,8000 - 856,048)$$

$$Q_{VYP} = 95567,0501 \text{ kW}$$

##### Výkon na straně spalin

$$Q_{VYP}^{sp} = Q_{st} + \sum Q_{par} \quad (8-2)$$

$$Q_{VYP}^{sp} = 89991,0362 + (2064,8469 + 774,5748 + 867,3543 + 247,8842 + 1265,2694)$$

$$Q_{VYP}^{sp} = 95210,9658 \text{ kW}$$

##### Odchylka

$$\Delta Q_{VYP} = \frac{Q_{VYP}^{sp} - Q_{VYP}}{Q_{VYP}^{sp}} = \frac{95210,9658 - 95567,0501}{95210,9658} = -0,374 \% < 0,5 \% \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (8-3)$$

#### 8.1.2 Kontrola výkonu kotle

##### Výrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i' - i_{nv}) \quad (8-4)$$

$$Q_v = 55,5556 \cdot (3433,0 - 553,4) + 0,01 \cdot 55,5556 \cdot (1420,8 - 553,4)$$

$$Q_v = 160,4598 \text{ MW}$$

##### Součtový výkon kotle

$$Q_b = Q_{st} + Q_b^{SH3A} + Q_b^{SH3B} + Q_b^{SH4} + Q_b^{SH2} + Q_b^{SH1B} + Q_b^{SH1A} + Q_b^{EKO3} + Q_b^{EKO2} + Q_b^{EKO1} + \sum Q_{par} \quad (8-5)$$

$$Q_b = 89991,0362 + 6328,1867 + 5302,9180 + 8438,0374 + 8820,9393 + 5658,9545 + 14718,7495 + 7036,6611 + 5116,1418 + 3526,594 + (2064,8469 + 774,5748 + 871,4073 + 247,8842 + 1265,2694)$$

$$Q_b = 160,1582 \text{ MW}$$

##### Odchylka

$$\Delta Q_{VYP} = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} = \frac{160,1582 - 160,4598}{160,1582} = -0,188 \% < 0,5 \% \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (8-6)$$

## 8.2 Dřevní štěpka

### 8.2.1 Kontrola výkonu výparníku

#### Výkon na straně média

$$Q_{VYP} = (M_{pp} - M_{v2} - M_{v1}) \cdot (i'' - i_{out}^{EKO3}) + M_o \cdot (i' - i_{out}^{EKO3}) \quad (8-7)$$

$$Q_{VYP} = (55,5556 - 0,5 - 3,95) \cdot (2719,900 - 856,048) + 0,5556 \cdot (1420,8000 - 856,048)$$

$$Q_{VYP} = 95567,0501 \text{ kW}$$

#### Výkon na straně spalin

$$Q_{VYP}^{sp} = Q_{st} + \sum Q_{par} \quad (8-8)$$

$$Q_{VYP}^{sp} = 89816,6752 + (2078,3931 + 742,0227 + 920,2670 + 292,7851 + 1296,4463)$$

$$Q_{VYP}^{sp} = 95146,5894 \text{ kW}$$

#### Odchylka

$$\Delta Q_{VYP} = \frac{Q_{VYP}^{sp} - Q_{VYP}}{Q_{VYP}^{sp}} = \frac{95146,5894 - 95567,0501}{95146,5894} = -0,442 \% < 0,5 \% \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (8-9)$$

### 8.2.2 Kontrola výkonu kotle

#### Výrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i' - i_{nv}) \quad (8-10)$$

$$Q_v = 55,5556 \cdot (3433,0 - 553,4) + 0,01 \cdot 55,5556 \cdot (1420,8 - 553,4)$$

$$Q_v = 160,4598 \text{ MW}$$

#### Součtový výkon kotle

$$Q_b = Q_{st} + Q_b^{SH3A} + Q_b^{SH3B} + Q_b^{SH4} + Q_b^{SH2} + Q_b^{SH1B} + Q_b^{SH1A} + Q_b^{EKO3} + Q_b^{EKO2} + Q_b^{EKO1} + \sum Q_{par} \quad (8-11)$$

$$Q_b = 89816,6752 + 6378,7434 + 5336,3053 + 8456,3637 + 8882,1121 + 5666,4849 + 14596,0960 + 6992,4018 + 5085,7001 + 3498,6943 + (2078,3931 + 742,0227 + 920,2670 + 292,7851 + 1296,4463)$$

$$Q_b = 160,0374 \text{ MW}$$

#### Odchylka

$$\Delta Q_{VYP} = \frac{Q_b - Q_v}{Q_b} = \frac{160,0374 - 160,4598}{160,0374} = -0,264 \% < 0,5 \% \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (8-12)$$

## 9 Závěr

Cílem této diplomové práce byl tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle pro spalování hnědého uhlí nebo biomasy ve formě čisté dřevní štěpky. Kotel o výkonu 200 t/h slouží k produkci přehřáté páry o teplotě 520 °C a tlaku 9,3 MPa.

V úvodní části návrhu byly na základě stechiometrických výpočtů určeny potřebné objemy a entalpie spalovacího vzduchu a spalin. Následně byl proveden výpočet tepelné bilance kotle včetně jeho ztrát. Z těchto ztrát byla určena účinnost kotle, kotle množství spalovaného paliva a dále tepelný výkon.

Dále následuje návrh spalovací komory a výpočet teploty na konci ohniště. Pro spalování daného paliva je použit pásový rošt s pohazováním paliva pomocí vzduchového ventilátoru a pohazovacího zařízení. Dané palivo je dopravováno ze zásobníku paliva pomocí šnekového dopravníku do násypky pohazovače, který zajišťuje nahazování paliva na rošt. Na roštu palivo postupně odhořívá a výsledný popel padá skrze rošt do sběrné nádoby.

Výpočet pokračuje návrhem geometrie výhřevných ploch. Kotel obsahuje dva stupně ohříváku vzduchu (AH1, AH2), tři stupně ohříváku vody (EKO1, EKO2, EKO3), tři přehříváky páry (SH4, SH2, SH1) a deskový přehřívák páry (SH3), který je rozdělen na dvě části. Mezi přehříváky SH2 a SH3 a mezi přehříváky SH3 a SH4 jsou zavedeny vstříky napájecí vody, které slouží k regulaci výkonu kotle. Oblasti přehříváku SH3, SH4 a SH2 jsou dále doplněny o paralelní plochy výparníkových trubek a paralelní plochu mříže.

Celý návrh kotle je zakončen kontrolou celkové tepelné bilance, jejíž výsledek se pohybuje v povolené toleranci  $\pm 0,5 \%$ . Z dosažených výsledků tedy vyplývá, že navržený roštový kotel je možné používat pro spalování uhlí i pro spalování dřevní štěpky.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. 4., přeprac. vyd. Brno: VUT, 1992, 200 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0426-4.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 212 s. ISBN 80-01-02591-8.
- [3] Firemní podklady
- [4] PRAVDA, Lukáš. Biomasa jako obnovitelný zdroj energie. In: *Energie z biomasy* [online]. 2004 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [www.eu.fme.vutbr.cz/file/279\\_1\\_1/](http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/279_1_1/)
- [5] Uhlí. *Fosilní paliva* [online]. 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.fospaliva.wz.cz/page01.htm>

**Seznam použitých symbolů**

$A^r$	[%]	obsah popela
$a_{pl}$	[–]	efektivní stupeň černosti plamene
$A$	[m]	šířka spalínového kanálu
$a_{stř}$	[–]	stupeň černosti povrchu stěn
$a$	[–]	stupeň černosti spalin
$B_0$	[–]	Boltzmannovo číslo
$B$	[m]	délka spalínového kanálu
$C^r$	[%]	obsah uhlíku
$Cl^r$	[%]	obsah chlóru
$CO_2 \max$	[%]	maximální množství $CO_2$ ve spalinách
$c$	[kJ · m <sup>-3</sup> · K <sup>-1</sup> ]	měrné teplo vlhkého vzduchu
$C_i$	[%]	procento hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků
$c_{sp}$	[kJ · m <sup>-3</sup> · K <sup>-1</sup> ]	měrné teplo spalin
$C_z, C_s$	[–]	korekční součinitele na straně spalin
$C_l, C_t$	[–]	korekční součinitele
$d$	[μm]	střední efektivní průměr částic popílku
$D$	[m]	vnější průměr trubek
$d$	[m]	vnitřní průměr trubek
$d_e$	[m]	ekvivalentní průměr
$D_{\dot{z}}$	[m]	průměr žeber
$E$	[–]	součinitel efektivnosti žebra
$F_{vst}^{SP}$	[m <sup>2</sup> ]	vstupní průtočný průřez spalin
$F_{výst}^{SP}$	[m <sup>2</sup> ]	výstupní průtočný průřez spalin
$F_{stř}^{SP}$	[m <sup>2</sup> ]	střední průtočný průřez spalin
$G_s$	[kg · kg <sup>-1</sup> ]	hmotnost spalin
$H^r$	[%]	obsah vodíku
$H$	[m]	výška spalínového kanálu
$H_{vst}$	[m]	vstupní výška spalínového kanálu
$H_{výst}$	[m]	výstupní výška spalínového kanálu
$H_{stř}$	[m]	střední výška spalínového kanálu
$H^{mř}$	[m]	výška rozvolněné mříže
$h_{\dot{z}}$	[m]	výška žeber
$I_{SP \min}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie minimálního množství spalin
$I_{SP}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva
$I_{VZ \min}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie minimálního množství vzduchu
$i_p$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	fyzické teplo paliva
$\Delta I_{vz \min}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	přírůstek entalpie minimálního množství vzduchu
$i_{pp}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie přehřáté páry
$i'$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie vroucí páry při tlaku v bubnu
$i_{nv}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie napájecí vody
$I'_{vz \min}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie minimálního množství horkého vzduchu
$I''_{vz \min}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie nasávaného studeného vzduchu

$I_u$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	teplo uvolněné ve spalovací komoře
$I_o$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	entalpie spalin na výstupu z ohniště pro $u_o$
$i_{in}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	vstupní entalpie
$i_{out}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výstupní entalpie
$k$	$[-]$	součinitel zeslabení sáláním
$k_k$	$[-]$	součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi
$k_{sp} \cdot r_{sp}$	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$	součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny
$k_p \cdot \mu_{pk}$	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$	součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
$k$	$[-]$	optická hustota spalin
$k_{př}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel prostupu tepla pro příčné proudění
$k_{pod}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel prostupu tepla pro podélné proudění
$k$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	celkový součinitel prostupu tepla
$L_i$	$[\text{m}]$	délka dané konvekční plochy
$M_{pp}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	parní výkon kotle
$M_o$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množství odluhu
$M_p$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pv}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množství skutečně spáleného paliva
$M_v$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množství vstříku
$m$	$[-]$	podíl tepla vysálaného z ohniště
$N^r$	$[\%]$	obsah dusíku
$n_d$	$[-]$	počet desek
$n_{tr}$	$[-]$	celkový počet trubek
$n_{tr}^{řad}$	$[-]$	počet trubek v řadě
$n_{řad}$	$[-]$	počet řad
$n_{část}$	$[-]$	počet částí
$n_z$	$[1/\text{m}]$	počet žeber na 1 m
$O^r$	$[\%]$	obsah kyslíku
$O_{O_2 \min}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva
$O_{vz \min}^s$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva
$O_{vz \min}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva
$O_{sp \min}^s$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální množství suchých spalin
$O_{CO_2}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	objem $CO_2$ ve spalinách
$O_{SO_2}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	objem $SO_2$ ve spalinách
$O_{N_2}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	objem $N_2$ ve spalinách
$O_{Ar}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	objem Ar ve spalinách
$O_{H_2O \min}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální objem vodní páry
$O_{sp \min}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální množství vlhkých spalin
$O_{vz}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	skutečné množství vzduchu s přebytkem $\alpha$
$O_{sp}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu $\alpha$
$O_{H_2O}$	$[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	skutečné množství vodní páry s přebytkem vzduchu $\alpha$

$\overline{O}_{sp} \cdot c$	[kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	střední celkové měrné teplo spalin
$O_{H_2O}$	[-]	poměrný objem vodní páry
$p''$	[MPa]	absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti
$p_c$	[MPa]	celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu
$p$	[MPa]	tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaku v ohništi
$p_{in}$	[MPa]	vstupní tlak
$p_{out}$	[MPa]	výstupní tlak
$p^{výp}$	[MPa]	tlak ve výparníku
$p_{pp}$	[MPa]	tlak přehřáté páry
$p_b$	[MPa]	barometrický tlak
$\Delta p_{sp}$	[kPa]	podtlak spalin
$Pr$	[-]	Prandtlovo číslo
$Q_i^r$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	výhřevnost paliva
$Q_{vzv}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	teplo ohřátí vnějším zdrojem mimo kotel
$Q_v$	[MW]	výrobní teplo páry
$q_v$	[kW · m <sup>-3</sup> ]	objemové zatížení ohniště
$q_s$	[MW · m <sup>-2</sup> ]	skutečné zatížení roštu
$Q_{vz}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	teplo přivedené do kotle se vzduchem
$\bar{q}$	[kW · m <sup>-2</sup> ]	střední tepelný tok
$Q_{st}$	[kW]	tepelný tok na trubky výparníku
$Q_{ods}$	[kW]	tepelný tok na výstupní okno
$Q_i$	[kW]	výkon jednotlivých ploch
$Q_b$	[kW]	tepelný výkon
$r_{RO_2}$	[-]	objemové části tříatomových plynů
$r_{H_2O}$	[-]	objemová část vodní páry ve spalinách
$r_{SP}$	[-]	součet objemových částí tříatomových plynů
$R$	[m <sup>2</sup> ]	skutečná plocha roštu
$S^r$	[%]	obsah síry
$S_{vo}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha výstupního okna
$S_{tr}$	[m <sup>2</sup> ]	celková plocha ohniště
$S_{st}$	[m <sup>2</sup> ]	povrch stěn ohniště
$S_{ús}$	[m <sup>2</sup> ]	účinná sálavá plocha stěn ohniště
$s$	[m]	účinná tloušťka sálavé vrstvy
$S_{ús}^{tr}$	[m <sup>2</sup> ]	účinná sálavá plocha stěn
$S_{ús}^{vo}$	[m <sup>2</sup> ]	účinná sálavá plocha výstupního okna
$s$	[m]	tloušťka stěny trubek
$s_1$	[m]	příčná rozteč trubek
$s_2$	[m]	podélná rozteč trubek
$S_{st}$	[m <sup>2</sup> ]	uzavřená plocha stěn
$s_{d1}$	[m]	příčná šířka desky
$s_{d2}$	[m]	podélná šířka desky
$S_d$	[m <sup>2</sup> ]	plocha jedné desky přehříváku
$S_{sál}$	[m <sup>2</sup> ]	velikost sálavé plochy
$S_{př}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha omývaná příčně



$S_{\text{pod}}$	$[\text{m}^2]$	plocha omývaná podélně
$S_i$	$[\text{m}^2]$	plocha dané konvekční plochy
$S_{\text{rad}}$	$[\text{m}^2]$	plocha jedné řady trubek
$S_i^{\text{skut}}$	$[\text{m}^2]$	skutečná plocha dané konvekční plochy
$S_{\text{ž}}$	$[\text{m}]$	rozteč žeber
$S_{\text{tr}}$	$[\text{m}^2]$	plocha trubek
$\frac{S_{\text{ž}}}{S}$	$[\text{m}^2]$	výhřevná plocha žeber
$\frac{S_{\text{h}}}{S}$	$[\text{m}^2]$	výhřevná plocha bez žeber
$S_s$	$[\text{m}^2]$	vnější plocha 1 m trubky
$S_v$	$[\text{m}^2]$	vnitřní plocha 1 m trubky
$t_i$	$[\text{°C}]$	teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků
$t_{\text{vz}}$	$[\text{°C}]$	teplota nasávaného vzduchu
$T_a$	$[\text{K}]$	teoretická teplota plamene
$t_{\text{in}}$	$[\text{°C}]$	vstupní teplota
$t_{\text{out}}$	$[\text{°C}]$	výstupní teplota
$t_{\text{pp}}$	$[\text{°C}]$	teplota přehřáté páry
$t_{\text{nv}}$	$[\text{°C}]$	teplota napájecí vody
$t_{\text{stř}}$	$[\text{°C}]$	střední teplota média
$t_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	$[\text{°C}]$	střední teplota spalin
$t_{\text{stř}}^{\text{st}}$	$[\text{°C}]$	střední teplota stěny
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	$[\text{K}]$	střední teplota spalin
$T_z$	$[\text{K}]$	teplota povrchu nánosů na straně spalin
$\Delta t$	$[\text{°C}]$	střední teplotní spád
$\Delta t_{\text{In}}$	$[\text{°C}]$	střední teplotní spád
$\Delta t_{\text{m}}$	$[\text{°C}]$	menší teplotní rozdíl
$\Delta t_{\text{v}}$	$[\text{°C}]$	větší teplotní rozdíl
$\Delta t_{\text{k}}$	$[\text{°C}]$	korigovaný teplotní spád
$t_{\text{ž}}$	$[\text{m}]$	tloušťka žeber
$V_o$	$[\text{m}^3]$	aktivní objem ohniště
$v_{\text{stř}}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	střední měrný objem
$V_{\text{sp}}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	skutečný průtok spalin
$V_{\text{vzd}}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	skutečný průtok vzduchu
$W_i^r$	$[\%]$	obsah celkové vody
$w_{\text{sp}}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost spalin
$w_{\text{par}}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost páry
$w_{\text{voda}}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	korigovaná rychlost vody
$w_{\text{vzd}}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	korigovaná rychlost vzduchu
$x_p$	$[\%]$	procento popela v úletu
$x_i$	$[\%]$	procento popela, zachycované v uvažovaném druhu tuhých zbytků
$x_{\text{st}}$	$[-]$	úhlový součinitel trubkové stěny
$x$	$[-]$	součinitel úhlového osálení desek
$z_{\text{co}}$	$[\%]$	ztráta chemickým nedopalem

$z_c$	[%]	ztráta mechanickým nedopalem
$z_f$	[%]	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$z_{so}$	[%]	ztráta sdílením tepla do okolí
$z_k$	[%]	ztráta fyzickým teplem spalin
$z_n$	[%]	ztráta nepočitatelná
$z_2$	[–]	počet trubek v desce
$\alpha, \beta$	[–]	přebytky vzduchu
$\alpha_0$	[–]	přebytek vzduchu na konci ohniště
$\Delta\alpha_0$	[–]	zvětšení přísávání v ohništi
$\alpha_c$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	celkový součinitel přestupu tepla
$\alpha_{k,př}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	stupeň přestupu tepla konvekcí pro příčné proudění
$\alpha_{k,pod}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění
$\alpha_p$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitele přestupu tepla na straně páry
$\alpha_{red}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	redukováný součinitel přestupu tepla
$\alpha_{sal}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_{spř}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla pro příčné proudění
$\alpha_{spod}$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla pro podélné proudění
$\varepsilon$	[m <sup>2</sup> · K · W <sup>-1</sup> ]	součinitel zanesení
$\eta_k$	[%]	tepelná účinnost kotle
$\eta$	[Pa · s <sup>-1</sup> ]	součinitel dynamické viskozity páry
$\kappa_1$	[–]	hodnota závislá na druhu paliva
$\kappa_2$	[–]	hodnota závislá na způsobu spalování
$\lambda$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_z$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti žeber
$\mu$	[–]	součinitel rozšíření žebra
$\mu$	[g · m <sup>-3</sup> ]	koncentrace popílku ve spalinách
$\mu_{pk}$	[kg · kg <sup>-1</sup> ]	koncentrace popílku ve spalinách
$\nu$	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]	součinitel kinematické viskozity páry
$\xi$	[–]	součinitel využití
$\xi$	[–]	součinitel zanesení stěn ohniště
$\sigma_1$	[–]	poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[–]	poměrná podélná rozteč
$\nu_k$	[°C]	teplota spalin za kotlem
$\nu_0$	[°C]	teplota spalin na konci ohniště
$\varphi$	[°C]	relativní vlhkost
$\varphi$	[–]	součinitel uchování tepla
$\bar{\psi}$	[–]	střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěny
$\omega$	[–]	součinitel omývání plochy

**Seznam obrázků**

Obrázek 1: Schéma spalovací komory .....	43
Obrázek 2: Schéma vstříku 1 .....	58
Obrázek 3: Schéma vstříku 2.....	59
Obrázek 4: Pilový diagram pro hnědé uhlí.....	63
Obrázek 5: Pilový diagram pro dřevní štěpku.....	64
Obrázek 6: Geometrie přehříváku SH3A .....	65
Obrázek 7: Teplotní spád SH3A.....	72
Obrázek 8: Geometrie přehříváku SH3B.....	75
Obrázek 9: Teplotní spád SH3B.....	82
Obrázek 10: Geometrie přehříváku SH4 .....	85
Obrázek 11: Teplotní spád SH4 .....	91
Obrázek 12: Geometrie přehříváku SH2 .....	94
Obrázek 13: Teplotní spád SH2 .....	100
Obrázek 14: Geometrie přehříváku SH1B .....	106
Obrázek 15: Teplotní spád SH1B.....	112
Obrázek 16: Geometrie přehříváku SH1A .....	113
Obrázek 17: Teplotní spád SH1A.....	118
Obrázek 18: Geometrie ekonomizéru 3 .....	120
Obrázek 19: Teplotní spád EKO3 .....	125
Obrázek 20: Geometrie ohříváku vzduchu AH2 .....	127
Obrázek 21: Teplotní spád AH2.....	131
Obrázek 22: Geometrie ekonomizéru 2.....	133
Obrázek 23: Teplotní spád EKO2 .....	138
Obrázek 24: Geometrie ekonomizéru 1 .....	139
Obrázek 25: Teplotní spád EKO1 .....	144
Obrázek 26: Geometrie ohříváku vzduchu AH1 .....	145
Obrázek 27: Teplotní spád AH1 .....	149
Obrázek 28: Geometrie přehříváku SH3A .....	150
Obrázek 29: Teplotní spád SH3A.....	157
Obrázek 30: Geometrie přehříváku SH3B .....	160
Obrázek 31: Teplotní spád SH3B.....	167
Obrázek 32: Geometrie přehříváku SH4 .....	170
Obrázek 33: Teplotní spád SH4 .....	176
Obrázek 34: Geometrie přehříváku SH2 .....	179
Obrázek 35: Teplotní spád SH2 .....	185
Obrázek 36: Geometrie přehříváku SH1B .....	191
Obrázek 37: Teplotní spád SH1B.....	197
Obrázek 38: Geometrie přehříváku SH1A .....	198
Obrázek 39: Teplotní spád SH1A.....	203
Obrázek 40: Geometrie ekonomizéru 3 .....	205
Obrázek 41: Teplotní spád EKO3 .....	210
Obrázek 42: Geometrie ohříváku vzduchu AH2 .....	211

---

Obrázek 43: Teplotní spád AH2 .....	215
Obrázek 44: Geometrie ekonomizéru 2 .....	217
Obrázek 45: Teplotní spád EKO2 .....	222
Obrázek 46: Geometrie ekonomizéru 1 .....	223
Obrázek 47: Teplotní spád EKO1 .....	228
Obrázek 48: Geometrie ohříváku vzduchu AH1 .....	229
Obrázek 49: Teplotní spád AH1 .....	233

**Seznam tabulek**

Tabulka 1: Složení paliva .....	23
Tabulka 2: Objemové složení suchého vzduchu v atmosféře.....	23
Tabulka 3: Entalpie základních složek spalín a měrné teplo v závislosti na teplotě .....	27
Tabulka 4: Entalpie spalín a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu .....	28
Tabulka 5: Složení paliva .....	29
Tabulka 6: Entalpie základních složek spalín a měrné teplo v závislosti na teplotě .....	32
Tabulka 7: Entalpie spalín a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu .....	33
Tabulka 8: Rozměry spalovací komory .....	43
Tabulka 9: Zadané hodnoty přehřáté páry .....	53
Tabulka 10: Tlakové ztráty a entalpické spády .....	53
Tabulka 11: Vstříky a odluh .....	53
Tabulka 12: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH1 pro hnědé uhlí .....	54
Tabulka 13: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH1 pro dřevní štěpku .....	54
Tabulka 14: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO1 .....	54
Tabulka 15: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO2 .....	55
Tabulka 16: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH2 pro hnědé uhlí .....	55
Tabulka 17: Hodnoty vzduchu na vstupu a na výstupu z AH2 pro dřevní štěpku .....	55
Tabulka 18: Hodnoty vody na vstupu a na výstupu z EKO3 .....	56
Tabulka 19: Hodnoty přehřáté páry a syté kapaliny výparníku.....	56
Tabulka 20: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH1a .....	57
Tabulka 21: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH1b .....	57
Tabulka 22: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH2 .....	57
Tabulka 23: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH3A .....	58
Tabulka 24: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH3B.....	58
Tabulka 25: Hodnoty páry na vstupu a na výstupu z SH4 .....	59
Tabulka 26: Tepelná bilance na straně média pro hnědé uhlí .....	60
Tabulka 27: Tepelná bilance na straně média pro dřevní štěpku .....	60
Tabulka 28: Tepelná bilance na straně spalín pro dřevní štěpku.....	61
Tabulka 29: Tepelná bilance na straně spalín pro dřevní štěpku.....	61
Tabulka 30: Parametry média deskového přehříváku SH3A .....	66
Tabulka 31: Parametry spalín deskového přehříváku SH3A pro hnědé uhlí .....	66
Tabulka 32: Látkové vlastnosti spalín pro střední teplotu v SH3A pro hnědé uhlí.....	68
Tabulka 33: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3A pro hnědé uhlí.....	68
Tabulka 34: Parametry média deskového přehříváku SH3B.....	76
Tabulka 35: Parametry spalín deskového přehříváku SH3B pro hnědé uhlí.....	76
Tabulka 36: Látkové vlastnosti spalín pro střední teplotu v SH3B pro hnědé uhlí.....	78
Tabulka 37: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3B pro hnědé uhlí .....	78
Tabulka 38: Parametry média přehříváku SH4 .....	86
Tabulka 39: Parametry spalín přehříváku SH4 pro hnědé uhlí .....	86
Tabulka 40: Látkové vlastnosti spalín pro střední teplotu v SH4 pro hnědé uhlí .....	87
Tabulka 41: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH4 pro hnědé uhlí.....	88
Tabulka 42: Parametry média přehříváku SH2 .....	95

Tabulka 43: Parametry spalin přehříváku SH2 pro hnědé uhlí .....	95
Tabulka 44: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH2 pro hnědé uhlí .....	96
Tabulka 45: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH2 pro hnědé uhlí .....	97
Tabulka 46: Parametry spalin mříže .....	103
Tabulka 47: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v mříži pro hnědé uhlí .....	104
Tabulka 48: Parametry média přehříváku SH1B .....	107
Tabulka 49: Parametry spalin přehříváku SH1B pro hnědé uhlí .....	107
Tabulka 50: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1B pro hnědé uhlí .....	108
Tabulka 51: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1B pro hnědé uhlí .....	109
Tabulka 52: Parametry média přehříváku SH1A .....	114
Tabulka 53: Parametry spalin přehříváku SH1A pro hnědé uhlí .....	114
Tabulka 54: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1A pro hnědé uhlí .....	115
Tabulka 55: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1A pro hnědé uhlí .....	116
Tabulka 56: Parametry média ekonomizéru 3 .....	121
Tabulka 57: Parametry spalin ekonomizéru 3 pro hnědé uhlí .....	121
Tabulka 58: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO3 pro hnědé uhlí .....	122
Tabulka 59: Parametry média ohříváku vzduchu AH2 .....	128
Tabulka 60: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH2 pro hnědé uhlí .....	128
Tabulka 61: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH2 pro hnědé uhlí .....	129
Tabulka 62: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH2 pro hnědé uhlí .....	130
Tabulka 63: Parametry média ekonomizéru 2 .....	134
Tabulka 64: Parametry spalin ekonomizéru 2 pro hnědé uhlí .....	134
Tabulka 65: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO2 pro hnědé uhlí .....	135
Tabulka 66: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO 2 pro hnědé uhlí .....	137
Tabulka 67: Parametry média ekonomizéru 1 .....	140
Tabulka 68: Parametry spalin ekonomizéru 1 pro hnědé uhlí .....	140
Tabulka 69: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO1 pro hnědé uhlí .....	141
Tabulka 70: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO1 pro hnědé uhlí .....	143
Tabulka 71: Parametry média ohříváku vzduchu AH1 .....	146
Tabulka 72: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH1 pro hnědé uhlí .....	146
Tabulka 73: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH1 pro hnědé uhlí .....	147
Tabulka 74: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH1 pro hnědé uhlí .....	148
Tabulka 75: Parametry média deskového přehříváku SH3A .....	151
Tabulka 76: Parametry spalin deskového přehříváku SH3A pro dřevní štěpku .....	151
Tabulka 77: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3A pro dřevní štěpku .....	153
Tabulka 78: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3A pro dřevní štěpku .....	153
Tabulka 79: Parametry média deskového přehříváku SH3B .....	161
Tabulka 80: Parametry spalin deskového přehříváku SH3B pro dřevní štěpku .....	161
Tabulka 81: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH3B pro dřevní štěpku .....	163
Tabulka 82: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH3B pro dřevní štěpku .....	163
Tabulka 83: Parametry média přehříváku SH4 .....	171
Tabulka 84: Parametry spalin přehříváku SH4 pro dřevní štěpku .....	171
Tabulka 85: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH4 pro dřevní štěpku .....	172
Tabulka 86: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH4 pro dřevní štěpku .....	173

Tabulka 87: Parametry média přehříváku SH2 .....	180
Tabulka 88: Parametry spalin přehříváku SH2 pro dřevní štěpku.....	180
Tabulka 89: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH2 pro dřevní štěpku.....	181
Tabulka 90: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu .....	182
Tabulka 91: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v mříži pro dřevní štěpku .....	189
Tabulka 92: Parametry média přehříváku SH1B.....	192
Tabulka 93: Parametry spalin přehříváku SH1B pro dřevní štěpku .....	192
Tabulka 94: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1B pro dřevní štěpku.....	193
Tabulka 95: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1B pro dřevní štěpku .....	194
Tabulka 96: Parametry média přehříváku SH1A .....	199
Tabulka 97: Parametry spalin přehříváku SH1A pro dřevní štěpku.....	199
Tabulka 98: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v SH1A pro dřevní štěpku.....	200
Tabulka 99: Látkové vlastnosti páry pro střední teplotu v SH1A pro dřevní štěpku .....	201
Tabulka 100: Parametry média ekonomizéru 3 .....	206
Tabulka 101: Parametry spalin ekonomizéru 3 pro dřevní štěpku .....	206
Tabulka 102: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO3 pro dřevní štěpku ...	207
Tabulka 103: Parametry média ohříváku vzduchu AH2 .....	212
Tabulka 104: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH2 pro dřevní štěpku .....	212
Tabulka 105: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH2 pro dřevní štěpku.....	213
Tabulka 106: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu v AH2 pro dřevní štěpku..	214
Tabulka 107: Parametry média ekonomizéru 2 .....	218
Tabulka 108: Parametry spalin ekonomizéru 2 pro dřevní štěpku .....	218
Tabulka 109: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO2 pro dřevní štěpku ...	219
Tabulka 110: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO2 pro dřevní štěpku.....	221
Tabulka 111: Parametry média ekonomizéru 1 .....	224
Tabulka 112: Parametry spalin ekonomizéru 1 pro dřevní štěpku .....	224
Tabulka 113: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v EKO1 pro dřevní štěpku ...	225
Tabulka 114: Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu v EKO1 pro dřevní štěpku.....	227
Tabulka 115: Parametry média ohříváku vzduchu AH1 .....	230
Tabulka 116: Parametry spalin ohříváku vzduchu AH1 pro dřevní štěpku .....	230
Tabulka 117: Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu v AH1 pro dřevní štěpku.....	231
Tabulka 118: Látkové vlastnosti vzduchu pro střední teplotu.....	232

**Seznam grafů**

Graf 1: Závislost entalpií spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu .....	28
Graf 2: Závislost entalpií spalin a vzduchu pro různé součinitele přebytku vzduchu .....	34



## **Seznam příloh**

Příloha 1: Výkresová dokumentace kotle