



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH PARNÍHO KOTLE NA SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ, PARAMETRY PÁRY 235 T/H, 14 MPA, 540°C

STEAM BOILER FOR SUB BITUMINOUS COAL, STEAM PARAMETRES 235 T/H, 14 MPA, 540°C

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. STANISLAV HORÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Stanislav Horák

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

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

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

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí, parametry páry 235 t/h, 14 MPa, 540°C

v anglickém jazyce:

Stein boiler for sub bituminous coal, steam parameters 235 t/h, 14 MPa, 540°C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí, tepelný výpočet kotle, dimenzování výhřevných ploch a řazení ploch v kotli.

Kotel je konstruován pro generování vysokotlaké páry a optimalizován dosažení vysoké účinnosti kotle. Kotel řešte jako podtlakový s dodatkovým tahem a výhřevnými plochami ohříváku vody (EKO) a přehříváky páry s regulací teploty páry dvěma vstříky napájecí vodou.

Podmínky stavby

Lokalizace: Batam, Indonesia

Nadmořská výška 6,5 m asl.

Vztažná teplota okolí: +32 °C

Vztažná vlhkost okolí: 80 %

Cíle diplomové práce:

Tepelný návrh parního kotle včetně výkresové dokumentace.

Vyčíslete dosaženou účinnost pro teplotu okolí 25 °C.

Práci doplňte o diagram průběhu teplot pracovního media a spalin.

Seznam odborné literatury:

Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Budaj: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

Baláš, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 7.11.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout kotel na spalování hnědého uhlí o výkonu 235 t/h. Práce je rozdělena do několika částí. Prvně jsou provedeny stechiometrické výpočty a výpočty entalpie vzduchu a spalin. Následuje výpočet tepelné bilance kotle, ztrát kotle a určení tepelné účinnosti kotle. Po navržení spalovací komory je proveden její tepelný výpočet. Následně jsou navrženy jednotlivé výhřevné plochy a na konci výpočtu se kontroluje celková tepelná bilance kotle. K výpočtu byla zhotovena výkresová dokumentace.

ABSTRACT

The aim of the work is to design a brown coal combustion boiler of 235 t/h output. The work is divided into several parts. First, stoichiometric calculations and calculations enthalpy of air and flue gas are performed. It is calculated heat balance of the boiler, the boiler losses and the thermal efficiency of the boiler is determined. After designing the combustion chamber thermal calculation is made. Then, individual heating surfaces are proposed and at the end of the calculations are controlling the overall energy balance of the boiler. For calculation was design documentation added.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parní kotel, hnědé uhlí, účinnost kotle, výparník, přehřívák, ekonomizér, ohřívák vzduchu.

KEYWORDS

Steam boiler, brown coal, boiler efficiency, evaporator, super heater, economizer, air heater.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORÁK, S. Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí, parametry páry 235 t/h, 14 MPa, 540 °C. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 128 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí, parametry páry 235 t/h, 14 MPa, 540 °C vypracoval samostatně s použitím odborné literatury, pramenů a odborných konzultací, uvedených na seznamu, který je součástí této práce.

28. května 2014

.....
Stanislav Horák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Marku Balášovi, Ph.D. a panu Ing. Mirko Hudečkovi, CSc. za vstřícný přístup při konzultacích, poskytnutí podkladů, užitečné rady a připomínky a pomoc při řešení problémů ve výpočtu. Dále děkuji své rodině, kamarádům a spolužákům za podporu a pomoc během mého studia.

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

OBSAH

1	ÚVOD.....	- 14 -
1.1	Parní kotel na tuhá paliva	- 14 -
2	STECHEMETRIE SPALIN	- 16 -
2.1	Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva	- 16 -
2.2	Minimální objemy vzduchu a spalin z hrubého rozboru paliva	- 18 -
2.3	Součinitel přebytku vzduchu a objemy spalin a vodní páry	- 19 -
2.4	Entalpie vzduchu a produktů spalování	- 20 -
3	TEPELNÁ BILANCE KOTLE	- 23 -
3.1	Teplo přivedené do kotle.....	- 23 -
3.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost	- 24 -
3.2.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem).....	- 24 -
3.2.2	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem).....	- 24 -
3.2.3	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	- 25 -
3.2.4	Ztráta sdílením tepla do okolí	- 25 -
3.2.5	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta).....	- 25 -
3.2.6	Ztráta nepočitatelná.....	- 26 -
3.2.7	Tepelná účinnost kotle	- 26 -
3.3	Výrobní teplo páry a množství paliva	- 26 -
3.3.1	Výrobní teplo páry	- 26 -
3.3.2	Množství paliva.....	- 27 -
4	VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY	- 28 -
4.1	Objem ohniště	- 29 -
4.2	Plochy ohniště	- 29 -
4.3	Tepelný výpočet ohniště	- 30 -
4.3.1	Součinitel M.....	- 30 -
4.3.2	Boltzmannovo číslo	- 31 -
4.3.3	Stupeň černosti ohniště	- 33 -
4.3.4	Teplota spalin na konci ohniště	- 35 -
4.4	Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn	- 35 -
5	NÁVRH KONVEKČNÍCH PLOCH	- 36 -
5.1	Zadané hodnoty	- 36 -
5.2	Tlakové ztráty konvekčních ploch	- 36 -
5.3	Tepelná bilance na straně média (voda/pára/vzduch)	- 37 -

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

5.3.1	Přehřívák páry (PP3).....	- 37 -
5.3.2	Přehřívák páry (PP2).....	- 37 -
5.3.3	Přehřívák páry (PP1).....	- 38 -
5.3.4	Stropní přehřívák páry (SPP).....	- 40 -
5.3.5	Výparník (VÝP).....	- 40 -
5.3.6	Ekonomizér (EKO).....	- 41 -
5.3.7	Ohřívák vzduchu (OVZ).....	- 42 -
5.3.8	Celkový potřebný tepelný výkon.....	- 43 -
5.3.9	Přehled vypočtených parametrů	- 43 -
5.4	Tepelná bilance na straně spalin	- 43 -
5.4.1	Přehled vypočtených parametrů	- 44 -
5.5	Pilový diagram	- 45 -
6	ROZVRŽENÍ VÝPOČTU JEDNOTLIVÝCH KONVEKČNÍCH PLOCH.....	- 46 -
7	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 1.....	- 48 -
7.1	Deskový přehřívák páry (PP2).....	- 48 -
7.1.1	Geometrie deskového přehříváku	- 48 -
7.1.2	Parametry páry a spalin	- 49 -
7.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 50 -
7.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry.....	- 51 -
7.1.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 51 -
7.1.6	Součinitel prostupu tepla	- 52 -
7.1.7	Tepelný výkon PP2.....	- 53 -
7.2	První úsek stropního přehříváku páry (SPP).....	- 55 -
7.2.1	Geometrie stropního přehříváku	- 55 -
7.2.2	Parametry páry a spalin	- 55 -
7.2.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 56 -
7.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 56 -
7.2.5	Součinitel prostupu tepla	- 57 -
7.2.6	Tepelný výkon SPP1.....	- 58 -
7.3	Výparné trubky po stěnách (VÝP).....	- 59 -
7.3.1	Geometrie výparných trubek	- 59 -
7.3.2	Parametry páry a spalin	- 59 -
7.3.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 60 -
7.3.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 60 -

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.3.5	Součinitel prostupu tepla	- 61 -
7.3.6	Tepelný výkon VÝP1	- 62 -
8	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 2.....	- 63 -
8.1	Výstupní přehřívák páry (PP3).....	- 63 -
8.1.1	Geometrie přehříváku	- 63 -
8.1.2	Parametry páry a spalin.....	- 64 -
8.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 65 -
8.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry	- 65 -
8.1.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 66 -
8.1.6	Součinitel prostupu tepla	- 67 -
8.1.7	Tepelný výkon PP3	- 68 -
8.2	Druhý úsek stropního přehříváku páry (SPP)	- 69 -
8.2.1	Geometrie stropního přehříváku	- 69 -
8.2.2	Parametry páry a spalin.....	- 69 -
8.2.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 70 -
8.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 70 -
8.2.5	Součinitel prostupu tepla	- 71 -
8.2.6	Tepelný výkon SPP2.....	- 72 -
8.3	Výparné trubky na šikmém dnu (VÝP)	- 73 -
8.3.1	Geometrie výparných trubek	- 73 -
8.3.2	Parametry páry a spalin.....	- 73 -
8.3.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 74 -
8.3.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 74 -
8.3.5	Součinitel prostupu tepla	- 75 -
8.3.6	Tepelný výkon VÝP2	- 76 -
8.4	Výparné trubky po stěnách (VÝP).....	- 77 -
8.4.1	Geometrie výparných trubek	- 77 -
8.4.2	Parametry páry a spalin.....	- 77 -
8.4.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 78 -
8.4.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 78 -
8.4.5	Součinitel prostupu tepla	- 79 -
8.4.6	Tepelný výkon VÝP3	- 80 -
9	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 3.....	- 81 -
9.1	Mříž (VÝP)	- 81 -

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9.1.1	Geometrie mříže	- 81 -
9.1.2	Parametry páry a spalin	- 81 -
9.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 82 -
9.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry	- 83 -
9.1.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 83 -
9.1.6	Součinitel prostupu tepla	- 84 -
9.1.7	Tepelný výkon VÝP4	- 85 -
9.2	Třetí úsek stropního přehříváku páry (SPP).....	- 86 -
9.2.1	Geometrie stropního přehříváku	- 86 -
9.2.2	Parametry páry a spalin	- 86 -
9.2.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 87 -
9.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 87 -
9.2.5	Součinitel prostupu tepla	- 88 -
9.2.6	Tepelný výkon SPP3.....	- 89 -
10	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 4.....	- 90 -
10.1	Přehřívák páry (PP1)	- 90 -
10.1.1	Geometrie přehříváku	- 90 -
10.1.2	Parametry páry a spalin	- 91 -
10.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 92 -
10.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry	- 92 -
10.1.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 93 -
10.1.6	Součinitel prostupu tepla	- 94 -
10.1.7	Tepelný výkon PP1	- 95 -
10.2	Čtvrtý úsek stropního přehříváku páry (SPP).....	- 96 -
10.2.1	Geometrie stropního přehříváku	- 96 -
10.2.2	Parametry páry a spalin	- 96 -
10.2.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 97 -
10.2.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 97 -
10.2.5	Součinitel prostupu tepla	- 98 -
10.2.6	Tepelný výkon SPP4.....	- 99 -
10.3	Šestý úsek stropního přehříváku páry (SPP).....	- 100 -
10.3.1	Geometrie stropního přehříváku	- 100 -
10.3.2	Parametry páry a spalin	- 100 -
10.3.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 101 -

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.3.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 101 -
10.3.5	Součinitel prostupu tepla	- 102 -
10.3.6	Tepelný výkon SPP6.....	- 103 -
11	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 5.....	- 104 -
11.1	Mříž - pátý úsek stropního přehříváku páry (SPP).....	- 104 -
11.1.1	Geometrie mříže	- 104 -
11.1.2	Parametry páry a spalin.....	- 104 -
11.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 105 -
11.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry	- 106 -
11.1.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 106 -
11.1.6	Součinitel prostupu tepla	- 107 -
11.1.7	Tepelný výkon SPP5.....	- 108 -
12	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 6.....	- 109 -
12.1	Ekonomizér (EKO).....	- 109 -
12.1.1	Geometrie ekonomizéru.....	- 109 -
12.1.2	Parametry vody a spalin.....	- 110 -
12.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 111 -
12.1.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	- 112 -
12.1.5	Součinitel prostupu tepla	- 113 -
12.1.6	Tepelný výkon EKO	- 114 -
13	SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 7.....	- 115 -
13.1	Ohřívák vzduchu (OVZ).....	- 115 -
13.1.1	Geometrie Ljungströmu	- 115 -
13.1.2	Parametry vzduchu a spalin	- 115 -
13.1.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí u vzduchu	- 117 -
13.1.4	Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin	- 117 -
13.1.5	Součinitel prostupu tepla	- 117 -
13.1.6	Tepelný výkon OVZ	- 118 -
14	KONTROLA TEPELNÉ BILANCE	- 120 -
15	ZÁVĚR	- 122 -
16	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	- 123 -
17	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 124 -
18	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 128 -

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

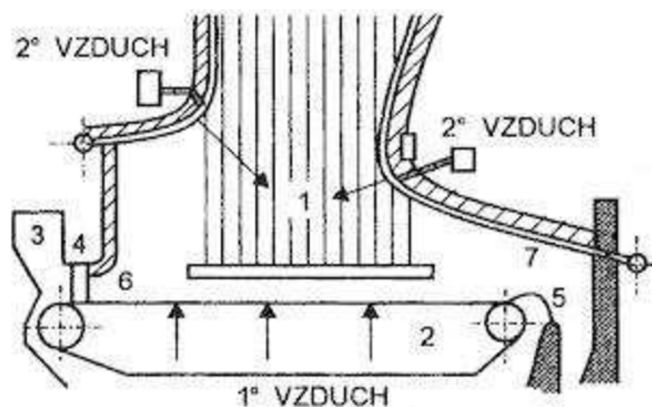
1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je návrh a výpočet parního kotle pro výrobu vysokotlaké páry (235 t/h , 14 MPa , 540 °C). Palivo kotle je hnědé uhlí daných parametrů. Kotel je navržen pro lokalitu Batam v Indonésii, kde obecně platí vyšší hodnoty vztažné teploty a vlhkosti okolí. Dané palivo s poměrně vysokým obsahem vlhkosti je považované za méněhodnotné energetické uhlí, tudíž je kotel realizován jako práškový s granulačním ohništěm. Uhlí je spalováno v podobě rozemletého prášku, pro jeho přívod do spalovací komory slouží přímé foukání s ventilátorovými mlýny. Kotel je řešen jako podtlakový s dodatkovým tahem, výhřevnými plochami ohříváku vody a přehříváky páry s regulací teploty páry dvěma vstříky napájecí vodou.

1.1 Parní kotel na tuhá paliva

Jde o zařízení pro výrobu energetické či průmyslové páry požadovaného tlaku a teploty z vody. K přeměně vody na páru slouží tepelná energie, ta se získá spalováním paliva ve spalovací komoře, kdy se mění z jeho chemické energie. Spaliny vznikající v ohništi o určité vysoké teplotě prostupují spalínovým kanálem, kde se střetávají s jednotlivými konvekčními plochami, skrze které předávají svou tepelnou energii a ochlazují se. Kotle dělíme z mnoha hledisek, např. podle užití, provedení, tlaku, paliva atd. U tuhých paliv je základním dělení kotlů typ ohniště, ty rozlišujeme roštová, fluidní a prášková.

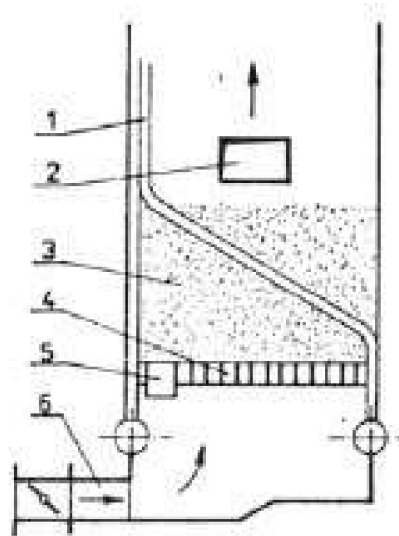
- kotle roštové – slouží ke spalování kusových paliv v pevné vrstvě. Používají se v průmyslu i domácím vytápění. V současné době se nové roštové kotle na uhlí téměř nestaví, je jich však velké množství v provozu. [1]



Obr. 1-1 Roštové ohniště – (1) ohniště, (2) rošt, (3) zásobník, (4) hradítko, (5) škvárový jizek, (6) přední klenba, (7) zadní klenba [1]

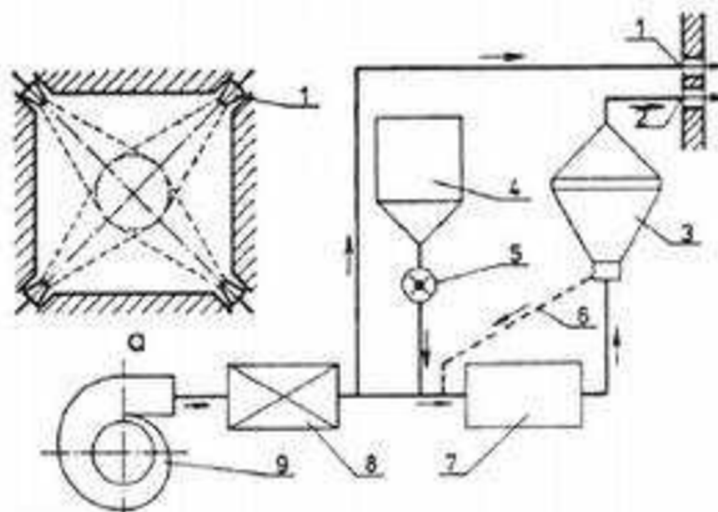
- kotle fluidní – kotle pracující na principu spalování paliva ve fluidní vrstvě byly vyvinuty pro spalování paliva širokého rozsahu. Fluidizace je obecně děj, v němž je soubor pevných látek udržován ve vznosu proudem tekutiny. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypných pod pórovité dno – tzv. fluidní rošt. [1]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí



Obr. 1-2 Fluidní ohniště – (1) ohřivací trubky, (2) přívod paliva, (3) fluidní vrstva, (4) fluidní rošt, (5) odvod popelu, (6) přívod vzduchu [4]

- kotle práškové – spalují uhelný prášek rozemletý na velikost zrn pod 1 mm, v prostoru ohniště. Rozemletím kusového uhlí na prášek dochází ke zvětšení měrného povrchu zrna 100 až 1000 násobně a tím dochází i k intenzivnějšímu spalování. Práškové kotle také nemají rošt, který omezuje teplotu primárního vzduchu a zatížení ohniště, a proto jsou používány pro nejvyšší výkony. Rozoznáváme dva typy práškových kotlů – granulační a výtavné. [1]



Obr. 1-3 Práškové ohniště – (1) přívod vzduchu, (2) hořák, (3) třídič, (4) zásobník uhlí, (5) podavač, (6) vratné potrubí hrubého prášku, (7) mlýn, (8) ohřivač vzduchu, (9) ventilátor [4]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

2 STECHIOMETRIE SPALIN

Výpočet daných hodnot (objemů a entalpií) je vztažen na 1 kg spáleného tuhého paliva za normálních podmínek, čili při teplotě 0 °C a tlaku 0,101 MPa. Vzorce jsou odvozeny za předpokladu dokonalého spalování, ale používají se i při malém chemickém nedopalu, který je dán normou kotlových ztrát.

Složení vzorku paliva							
W_t^r [%]	A^r [%]	C^r [%]	H_2^r [%]	N_2^r [%]	S^r [%]	O_2^r [%]	Σ [%]
41,48	7,89	36,95	3,33	0,11	0,11	10,13	100

Tab. 2-1 Složení paliva

Složku síry dále dělím na spalitelnou složku S_{spal}^r a síranovou složku $S_{síran}^r$, kterou pro další výpočet přičtu ke složce popele A^r .

$$S_{spal}^r = 0,7 \cdot S^r = 0,7 \cdot 0,11 = 0,077 \%$$

$$S_{síran}^r = 0,3 \cdot S^r = 0,3 \cdot 0,11 = 0,033 \%$$

$$A^r = 7,89 + S_{síran}^r = 7,89 + 0,033 = 7,923 \%$$

2.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva

Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva:

$$\begin{aligned} O_{O_2 \min} &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{spal}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) = \\ &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{36,95}{12,01} + \frac{3,33}{4,032} + \frac{0,077}{32,06} - \frac{10,13}{32} \right) = 0,803 \frac{m^3}{kg} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 2-1})$$

$C^r, H_2^r, S_{spal}^r, O_2^r$ - složky paliva v hmotnostních procentech hrubého vzorku

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ \min}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2 \min} = \frac{100}{21} \cdot 0,803 = 3,826 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-2})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Objem vodní páry na 1 m³ suchého vzduchu:

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_C - p''} = 0,8 \cdot 0,034 = 0,027 \quad (\text{Rov. 2-3})$$

φ - relativní vlhkost vzduchu

p'' - absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu

p_C - celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

Velikost výrazu $\frac{p''}{p_C - p''}$ pro teplotu 25 °C určíme z [2].

Součinitel f:

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_C - p''} = 1 + 0,8 \cdot 0,034 = 1,027 \quad (\text{Rov. 2-4})$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ \min} = f \cdot O_{VZ \min}^S = 1,027 \cdot 3,826 = 3,93 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-5})$$

Minimální množství suchých spalin:

Vznikne dokonalým spálením paliva při minimálním přebytku vzduchu $\alpha = 1$. Je dán součtem jednotlivých složek ve spalinách.

$$\begin{aligned} O_{SP \min}^S &= O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 0,686 + 0,0005 + 2,987 + 0,035 \\ &= 3,709 \frac{m^3}{kg} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 2-6})$$

Objem oxidu uhličitého ve spalinách:

$$\begin{aligned} O_{CO_2} &= \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ \min}^S = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{36,95}{12,01} + 0,0003 \cdot 3,826 \\ &= 0,686 \frac{m^3}{kg} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 2-7})$$

Objem oxidu siřičitého ve spalinách:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{spal}^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,077}{32,06} = 0,0005 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-8})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Objem dusíku ve spalinách:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N_2^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ\ min}^S = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,11}{28,016} + 0,7805 \cdot 3,826$$

$$= 2,987 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-9})$$

Objem argonu ve spalinách:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ\ min}^S = 0,0092 \cdot 3,826 = 0,035 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-10})$$

Maximální množství oxidu uhličitého ve spalinách:

$$(CO_2)_{max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SP\ min}^S} \cdot 100 = \frac{0,686}{3,709} \cdot 100 = 18,497 \% \quad (\text{Rov. 2-11})$$

Minimální objem vodní páry:

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

$$= \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,33}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{41,48}{18,016} + (1,027 - 1) \cdot 3,826 = 0,99 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-12})$$

Minimální množství vlhkých spalin:

$$O_{SP\ min} = O_{SP\ min}^S + O_{H_2O\ min} = 3,709 + 0,99 = 4,699 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-13})$$

2.2 Minimální objemy vzduchu a spalin z hrubého rozboru paliva

Vychází se z poznatků, že teplo vyvinuté spálením libovolné látky je úměrné množství spalovacího kyslíku. Jedná se o empirické vzorce.

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva:

$$O_{VZ\ min}^S = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{13351}{4187} = 3,727 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-14})$$

Q_i^r - výhřevnost paliva [kJ/kg]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Minimální množství vlhkých spalin při použití suchého vzduchu:

$$O_{SP\ min}^{SV} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{13351}{4187} = 4,404 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-15})$$

2.3 Součinitel přebytku vzduchu a objemy spalin a vodní páry

Spalovat s vhodným přebytkem vzduchu je důležité pro správný provoz kotle. Při nedostatku spalovacího vzduchu dochází k nedokonalému spalování a vzniká oxid uhelnatý, reakce tak spotřebovává méně kyslíku a dodává méně energie. Při vyšším než vhodným přebytkem spalovacího vzduchu se zase zvyšuje komínová ztráta.

Přebytky vzduchu		
Pro spalování	α_S	1,15
Na výstupu spalovací komory	α	1,25
Před ohřívákem vzduchu	β	1,25
Na výstupu z kotle	α_K	1,3

Tab. 2-2 Přebytky vzduchu

Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu:

$$O_{SP} = O_{SP\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\ min} = 4,699 + (1,25 - 1) \cdot 3,93 = 5,681 \frac{m^3}{kg} \quad (\text{Rov. 2-16})$$

Skutečné množství vodní páry s přebytkem vzduchu:

$$\begin{aligned} O_{H_2O} &= O_{H_2O\ min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\ min}^S \\ &= 0,99 + (1,027 - 1) \cdot (1,25 - 1) \cdot 3,826 = 1,016 \frac{m^3}{kg} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 2-17})$$

Objemové části tříatomových plynů:

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0,0005 + 0,686}{5,681} = 0,121 \quad (\text{Rov. 2-18})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{1,016}{5,681} = 0,179 \quad (\text{Rov. 2-19})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,121 + 0,179 = 0,3 \quad (\text{Rov. 2-20})$$

Koncentrace popílku ve spalinách:

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{SP}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 7,923}{5,681} \cdot \frac{87}{100} = 12,134 \frac{g}{m^3} \quad (\text{Rov. 2-21})$$

A^r - procento popelovin v původním vzorku paliva

X_p - procento popelu v úletu [2]

Stejně výpočty se provedou i pro zbylé přebytky vzduchu, jejich výsledky jsou zaznamenány v tabulce:

	$\alpha_s = 1,15$	$\alpha = 1,25$	$\beta = 1,25$	$\alpha_K = 1,3$
$O_{SP} [m^3/kg]$	5,288	5,681	5,681	5,877
$O_{H_2O} [m^3/kg]$	1,005	1,016	1,016	1,021
$r_{RO_2} [-]$	0,130	0,121	0,121	0,117
$r_{H_2O} [-]$	0,190	0,179	0,179	0,174
$r_{SP} [-]$	0,320	0,300	0,300	0,291
$\mu [g/kg]$	13,035	12,134	12,134	11,728

Tab. 2-3 Produkty spalování při různých přebytcích vzduchu

2.4 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie spalin vzniklých při spálení 1 kg paliva a entalpie minimálního množství vzduchu získáme z následujícího výpočtu při uvažování různých teplot a přebytků vzduchu. Hodnoty entalpii jednotlivých složek spalin a měrných tepel dosazujeme z tabulky 2-4 a výsledky jsou uvedeny v tabulce 2-5. Vzorový výpočet je pro teplotu 100 °C a přebytek vzduchu $\alpha = 1,25$.

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Teplota	Entalpie složek spalin					Měrné teplo	
$t [^{\circ}C]$	$i_{CO_2} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$	$i_{SO_2} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$	$i_{N_2} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$	$i_{H_2O} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$	$i_{Ar} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$	$c_s \left[\frac{kJ}{m^3 \cdot K} \right]$	$c_{H_2O} \left[\frac{kJ}{m^3 \cdot K} \right]$
100	170	189	130	150	93	1,300	1,505
200	357	392	260	304	186	1,307	1,522
300	559	610	392	463	278	1,317	1,542
400	772	836	527	626	372	1,329	1,565
500	994	1070	666	795	465	1,343	1,590
600	1225	1310	804	969	557	1,356	1,615
700	1462	1550	948	1149	650	1,371	1,641
800	1705	1800	1094	1334	743	1,384	1,688
900	1952	2050	1240	1526	834	1,398	1,696
1000	2204	2305	1392	1723	928	1,410	1,723
1500	3504	3590	2166	2779	1390	1,462	1,853
2000	4844	4800	2965	3926	1855	1,500	1,963

Tab. 2-4 Entalpie a měrné teplo pro dané teploty

Entalpie minimálního množství spalin:

$$\begin{aligned}
 I_{SP \min} &= O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O \min} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \\
 &= 0,686 \cdot 170 + 0,0005 \cdot 189 + 2,987 \cdot 130 + 0,99 \cdot 150 + 0,035 \\
 &\quad \cdot 93 = 656,767 \frac{kJ}{kg}
 \end{aligned}
 \tag{Rov. 2-22}$$

Entalpie minimálního množství vzduchu:

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,027 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 16,913 \frac{g}{kg}
 \tag{Rov. 2-23}$$

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} = 1,3 + 0,0016 \cdot 16,913 \cdot 1,505 = 1,341 \frac{kJ}{m^3 \cdot K}
 \tag{Rov. 2-24}$$

$$I_{VZ \min} = O_{VZ \min}^S \cdot (c \cdot t)_{vz} = 3,826 \cdot (1,341 \cdot 100) = 512,942 \frac{kJ}{kg}
 \tag{Rov. 2-25}$$

c, c_s, c_{H_2O} - měrná tepelná kapacita

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Entalpie popílku:

- ve spalinách se uvažuje, jen pokud procento popelovin v palivu splňuje nerovnost

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

$$7,923 > \frac{6 \cdot 13351}{41,8 \cdot 87}$$

$7,923 < 22,028 \rightarrow$ nesplňuje, I_p se zanedbá

Entalpie spalin:

$$I_{SP} = I_{SP \min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ \min} + I_p = 656,767 + (1,25 - 1) \cdot 512,942 + 0$$

$$= 785,002 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Rov. 2-26})$$

Teplota	Vypočtené hodnoty					
$t [^{\circ}C]$	$c \left[\frac{kJ}{m^3 \cdot K} \right]$	$I_{SP \min} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$I_{VZ \min} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$I_{SP \alpha S} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$I_{SP \alpha, \beta} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$I_{SP \alpha K} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$
100	1,341	656,767	512,942	733,708	785,002	810,649
200	1,348	1329,162	1031,592	1483,901	1587,060	1638,640
300	1,359	2022,743	1559,487	2256,666	2412,615	2490,589
400	1,371	2736,865	2098,632	3051,659	3261,523	3366,454
500	1,386	3475,016	2651,365	3872,721	4137,857	4270,425
600	1,400	4221,271	3213,033	4703,226	5024,529	5185,181
700	1,415	4995,538	3790,594	5564,127	5943,186	6132,716
800	1,430	5784,849	4375,789	6441,217	6878,796	7097,586
900	1,444	6583,762	4971,714	7329,519	7826,691	8075,276
1000	1,457	7409,085	5572,832	8245,009	8802,292	9080,934
1500	1,512	11674,952	8677,853	12976,630	13844,416	14278,308
2000	1,553	16133,072	11884,012	17915,674	19104,075	19698,276

Tab. 2-5 Vypočtené entalpie vzduchu a spalin pro dané teploty

3 TEPELNÁ BILANCE KOTLE

3.1 Teplo přivedené do kotle

Fyzické teplo paliva:

Fyzické teplo paliva uvažujeme za předpokladu, že se palivo přehřívá cizím zdrojem mimo prostor kotle. Pakliže palivo není přehříváno, fyzické teplo uvažujeme jen u paliv, kde platí následující nerovnost.

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

$$41,48 \geq \frac{13351}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$41,48 \geq 21,243 \rightarrow \text{podmínka splněna, } i_p \text{ uvažujeme}$$

$$c_p = c_w \cdot \frac{W_t^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W_t^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{41,48}{100} + 1,13 \cdot \frac{100 - 41,48}{100}$$

$$= 2,399 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{Rov. 3-1})$$

c_p - měrné teplo tuhého paliva

$c_w = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ - měrné teplo vody

$c_{su} = 1,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ - měrné teplo sušiny paliva (hnědé uhlí)

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2,399 \cdot 25 = 59,982 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 3-2})$$

Teplo ohřátí vzduchu vnějším zdrojem:

$$Q_{VZV} = \beta' \cdot \Delta I_{VZ \min} = 1,13 \cdot 146,319 = 165,341 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 3-3})$$

$\beta' = 1,13$ - součinitel přebytku vzduchu [2]

$\Delta I_{VZ \min} = 146,319 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ - přírůstek entalpie minimálního množství vzduchu od teploty studeného vzduchu do teploty vzduchu na vstupu do ohříváku vzduchu

Teplo přivedené do kotle na 1 kg paliva:

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{VZV} = 13351 + 59,982 + 165,341 = 13576,323 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 3-4})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelná účinnost se stanoví pomocí nepřímé metody, kdy je výpočet účinnosti proveden pomocí ztrát kotle.

3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalínách (ztráta chemickým nedopalem)

Ztráta chemickým nedopalem je způsobená nedokonalým spalováním paliva, když ve spalínách zůstávají podíly spalitelných plynů. Tato ztráta se stanovuje pomocí empirických hodnot [2].

$$z_{CO} = 0,5 \%$$

3.2.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem)

Ztráta mechanickým nedopalem je dána součtem jednotlivých ztrát, které jsou způsobeny obsahem popílku v úletu a ztrátou ve škváře či strusce.

$$z_{CS} = \frac{C_S}{100 - C_S} \cdot \frac{X_S}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{CS} = \frac{6}{100 - 6} \cdot \frac{8}{100} \cdot \frac{7,923}{13576,323} \cdot 32600 = 0,097 \%$$
 (Rov. 3-5)

$$z_{C\dot{U}} = \frac{C_{\dot{U}}}{100 - C_{\dot{U}}} \cdot \frac{X_{\dot{U}}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{CS} = \frac{12}{100 - 12} \cdot \frac{87}{100} \cdot \frac{7,923}{13576,323} \cdot 32600 = 2,257 \%$$
 (Rov. 3-6)

$$z_C = z_{CS} + z_{C\dot{U}} = 0,097 + 2,257 = 2,354 \%$$
 (Rov. 3-7)

$C_S = 6 \%$ - hořlavina ve škváře a strusce

$C_{\dot{U}} = 12 \%$ - hořlavina v úletu

$X_S = 8 \%$ - obsah popelu ve škváře

$X_{\dot{U}} = 87 \%$ - obsah popelu v úletu

$Q_{CS} = 32600 \frac{kJ}{kg}$ - výhřevnost uhlíku

Tyto jednotlivé procentuální obsahy jsou získány z [2] a [3].

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

3.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je dána nevyužitým teplem odcházejícím v tuhých zbytcích, ať již úletem, škvárou či struskou.

$$z_{FS} = \frac{X_S}{100 - C_S} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_S \cdot t_S = \frac{8}{100 - 6} \cdot \frac{7,923}{13576,323} \cdot 0,934 \cdot 600 = 0,028 \% \quad (\text{Rov. 3-8})$$

$$z_{FÚ} = \frac{X_Ú}{100 - C_Ú} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_Ú \cdot t_Ú = \frac{87}{100 - 12} \cdot \frac{7,923}{13576,323} \cdot 0,831 \cdot 160 = 0,077 \% \quad (\text{Rov. 3-9})$$

$$z_F = z_{FS} + z_{FÚ} = 0,028 + 0,077 = 0,105 \% \quad (\text{Rov. 3-10})$$

$c_S, c_Ú$ - měrné teplo daných tuhých zbytků

$t_S, t_Ú$ - teplota daného druhu tuhých zbytků

3.2.4 Ztráta sdílením tepla do okolí

Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením se určuje podle závislosti výkonu kotle a druhu nátěru oplechování. Je volena na základě firemní dokumentace výrobce [3] dle normy ČSN 12952-15.

$$z_{SO} = 0,6 \%$$

3.2.5 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

Komínová ztráta je považována za nejvýznamnější ztrátu kotle. Roste s teplotou spalin a přebytkem vzduchu za kotlem. Spaliny odnášejí nevyužitě teplo do komína, uvažováno pro teplotu spalin za kotlem 160 °C.

$$I_{SP} = I_{SP \min} + (\alpha_K - 1) \cdot I_{VZ \min} = 160,204 + (1,3 - 1) \cdot 104,836 = 1091,655 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Rov. 3-11})$$

$$I_{VZ} = \alpha_K \cdot I_{VZ \min} = 1,3 \cdot 104,836 = 136,287 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Rov. 3-12})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$$z_K = (100 - z_C) \cdot \frac{I_{SP} - I_{VZ}}{Q_p^p} = (100 - 2,354) \cdot \frac{1091,655 - 136,287}{13576,323} = 6,871 \% \quad (\text{Rov. 3-13})$$

3.2.6 Ztráta nepočitatelná

Nepočitatelná ztráta nám eliminuje další možné ztráty během spalování, např. špatné prohořívání v rozích, nerovnoměrné rozložení tepla aj. Je volena na základě firemní dokumentace výrobce [3].

$$z_N = 0,2 \%$$

3.2.7 Tepelná účinnost kotle

$$\begin{aligned} \eta_K &= 100 - \sum z = 100 - (z_{CO} + z_C + z_F + z_{SO} + z_K + z_N) \\ &= 100 - (0,5 + 2,354 + 0,105 + 0,6 + 6,871 + 0,2) = 89,37 \% \end{aligned} \quad (\text{Rov. 3-14})$$

3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

3.3.1 Výrobní teplo páry

$$\begin{aligned} Q_V &= M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 65,278 \cdot (3434,201 - 990,210) = 159538,36 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\ &= 159,538 \text{ MW} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 3-15})$$

$$i_{pp} = 3434,201 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \text{ pro } p_{pp} = 14 \text{ MPa}, t_{pp} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i_{nv} = 990,210 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \text{ pro } t_{nv} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$M_{pp} = 65,278 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad - \text{ množství přehřáté páry}$$

$$i_{pp} \quad - \text{ entalpie přehřáté páry}$$

$$i_{nv} \quad - \text{ entalpie napájecí vody}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

3.3.2 Množství paliva

Množství paliva přivedeného do kotle:

$$M_p = \frac{Q_V}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_K}{100}} = \frac{159538,36}{13576,323 \cdot \frac{89,37}{100}} = 13,149 \frac{kg}{s} = 47,336 \frac{t}{h} \quad (\text{Rov. 3-16})$$

Množství paliva skutečně spáleného:

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_C}{100}\right) = 13,149 \cdot \left(1 - \frac{2,354}{100}\right) = 12,839 \frac{kg}{s} = 46,222 \frac{t}{h} \quad (\text{Rov. 3-17})$$

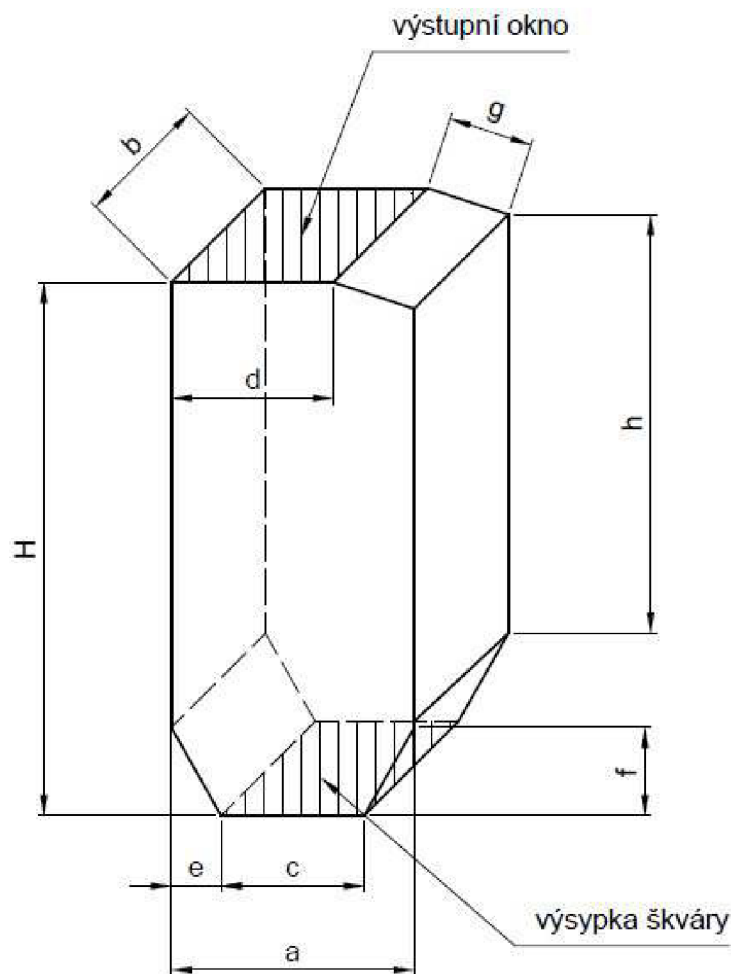
Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

4 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY

Jednotlivé rozměry spalovací komory jsou zvoleny na základě firemní dokumentace výrobce [3]. Ve spalovací komoře se nacházejí čtyři hořáky.

Šířka spalovací komory	$a = 8,28 \text{ m}$	Výška spodního zkosení	$f = 3 \text{ m}$
Hloubka spalovací komory	$b = 9,08 \text{ m}$	Délka horního zkosení	$g = 2,902 \text{ m}$
Šířka výsypky škváry	$c = 4,89 \text{ m}$	Výška pravé stěny spalovací komory	$h = 14,273 \text{ m}$
Šířka výstupního okna	$d = 5,527 \text{ m}$	Celková výška spalovací komory	$H = 18,17 \text{ m}$
Šířka spodního zkosení	$e = 1,695 \text{ m}$	Rozměr hořáku	$0,8 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

Tab. 4-1 Rozměry spalovací komory



Obr. 4-1 Spalovací komora

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

4.1 Objem ohniště

$$\begin{aligned}
 V_o &= (a \cdot b \cdot H) - \left(\frac{b \cdot (H - h - f) \cdot (a - d)}{2} \right) - (b \cdot e \cdot f) \\
 &= (8,28 \cdot 9,08 \cdot 18,17) \\
 &\quad - \left(\frac{9,08 \cdot (18,17 - 14,273 - 3) \cdot (8,28 - 5,527)}{2} \right) \\
 &\quad - (9,08 \cdot 1,695 \cdot 3) = 1308,681 \text{ m}^3
 \end{aligned}
 \tag{Rov. 4-1}$$

Objemové zatížení ohniště:

$$q_v = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{12,839 \cdot 13351}{1308,681} = 130,986 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}
 \tag{Rov. 4-2}$$

4.2 Plochy ohniště

Plocha hořáků:

$$S_h = 4 \cdot 0,8 \cdot 2 = 6,4 \text{ m}^2
 \tag{Rov. 4-3}$$

Plocha stěn s trubkami:

$$\begin{aligned}
 S_{tr} &= \left[2 \cdot \left(\frac{a+c}{2} \right) \cdot f \right] + \left[2 \cdot \left(\sqrt{e^2 + f^2} \right) \cdot b \right] + [b \cdot (H - f)] + [b \cdot h] + [b \cdot g] \\
 &\quad + \left\{ 2 \cdot \left[(H - f) \cdot a - \frac{(H - h - f) \cdot (a - d)}{2} \right] \right\} - S_h \\
 &= \left[2 \cdot \left(\frac{8,28 + 4,89}{2} \right) \cdot 3 \right] + \left[2 \cdot \left(\sqrt{1,695^2 + 3^2} \right) \cdot 9,08 \right] \\
 &\quad + [9,08 \cdot (18,17 - 3)] + [9,08 \cdot 14,273] + [9,08 \cdot 2,902] \\
 &\quad + \left\{ 2 \right. \\
 &\quad \cdot \left[(18,17 - 3) \cdot 8,28 - \frac{(18,17 - 14,273 - 3) \cdot (8,28 - 5,527)}{2} \right] \left. \right\} \\
 &\quad - 6,4 = 638,123 \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{Rov. 4-4}$$

Plocha výstupního okna:

$$S_{vo} = b \cdot d = 9,08 \cdot 5,527 = 50,185 \text{ m}^2
 \tag{Rov. 4-5}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Plocha výsypky škváry:

$$S_{vš} = b \cdot c = 9,08 \cdot 4,89 = 44,401 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 4-6})$$

Povrch stěn ohniště:

$$S_{st} = S_{tr} + S_{vo} + S_{vš} = 638,123 + 50,185 + 44,401 = 732,709 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 4-7})$$

4.3 Tepelný výpočet ohniště

Je založen na použití teorie podobnosti v tepelných procesech ve spalovací komoře. Vzorce pro výpočet zahrnují závislosti poměrné teploty spalin na výstupu z ohniště s číslem Boltzmannova B_o , stupněm černosti ohniště a_o a součinitelem M , který charakterizuje průběh teploty po výšce ohniště [2].

Pro následující výpočet je nutné nejprve zvolit poměrnou teplotu spalin na výstupu z ohniště ϑ_o , výpočet je nutné provádět iterací tak dlouho, než dojdeme k téměř shodné poměrné teplotě spalin zvolené a vypočtené, tyto hodnoty se nesmí lišit o více než 20 °C. Zvolená poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště:

$$\vartheta_o = 1170 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.3.1 Součinitel M

Je závislý na maximální poloze teploty plamene, u práškových ohnišť je tato poloha rovna poměrné výšce hořáků x_h .

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{7,905}{18,17} = 0,435 \quad (\text{Rov. 4-8})$$

$h_h = 7,905 \text{ m}$ - výška hořáků od dolní hranice ohniště ve výsypce

$h_c = H = 18,17 \text{ m}$ - celková výška ohniště

$$M = 0,56 - 0,5 \cdot x_h = 0,56 - 0,5 \cdot 0,435 = 0,343 \quad (\text{Rov. 4-9})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

4.3.2 Boltzmannovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot C}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{st} \cdot T_a^3} = \frac{0,993 \cdot 12,839 \cdot 10,202}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,428 \cdot 732,709 \cdot 1895,598^3} = 1,07 \quad (\text{Rov. 4-10})$$

- φ - součinitel uchování tepla
 M_{pv} - množství skutečně spáleného paliva
 $\overline{O_{sp} \cdot C}$ - střední celkové měrné teplo spalin
 $5,7 \cdot 10^{-11}$ - Boltzmannova konstanta sálání absolutně černého tělesa
 $\bar{\psi}$ - střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn
 S_{st} - celkový povrch stěn ohniště
 T_a - teoretická teplota plamene

Součinitel uchování tepla:

$$\varphi = 1 - \frac{z_{SO}}{\eta_K + z_{SO}} = 1 - \frac{0,6}{89,37 + 0,6} = 0,993 \quad (\text{Rov. 4-11})$$

- z_{SO} - ztráta sdílením tepla do okolí
 η_K - tepelná účinnost kotle

Střední celkové měrné teplo spalin:

$$\overline{O_{sp} \cdot C} = \frac{I_u - I_o}{\vartheta_a - \vartheta_o} = \frac{15132,481 - 10516,614}{1622,448 - 1170} = 10,202 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{Rov. 4-12})$$

- I_u - užitečné teplo uvolněné v ohništi
 I_o - entalpie spalin na výstupu z ohniště
 ϑ_a - adiabatická teplota plamene
 ϑ_o - teplota spalin na výstupu z ohniště

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Užitečné teplo uvolněné v ohništi:

$$\begin{aligned}
 I_u &= Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{CO} - z_C - z_{FS}}{100 - z_C} + Q_{VZ} - Q_{VZV} \\
 &= 13576,323 \cdot \frac{100 - 0,5 - 2,354 - 0,028}{100 - 2,354} + 1794,887 - 165,34 \quad (\text{Rov. 4-13}) \\
 &= 15132,481 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

- Q_p^p – teplo přivedené do kotle na 1 kg paliva
- z_{CO} – ztráta hořlavinou ve spalínách
- z_C – ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
- z_{FS} – ztráta fyzickým teplem strusky
- Q_{VZ} – teplo přivedené do kotle se vzduchem
- Q_{VZV} – teplo ohřátí vzduchu vnějším zdrojem

Ze známého uvolněného tepla v ohništi a pomocí výše vypočítané tabulky entalpií, lze snadno dopočítat adiabatickou teplotu plamene $\vartheta_a = 1622,448 \text{ }^\circ\text{C}$.

Teplo přivedené do kotle se vzduchem:

$$\begin{aligned}
 Q_{VZ} &= (\alpha_0 - \Delta\alpha_0 - \Delta\alpha_{ml}) \cdot I''_{VZ \min} + (\Delta\alpha_0 + \Delta\alpha_{ml}) \cdot I'_{VZ \min} \\
 &= (1,25 - 0,02 - 0,2) \cdot 1720,216 + (0,02 + 0,2) \cdot 104,836 \\
 &= 1794,887 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 4-14})
 \end{aligned}$$

- α_0 – součinitel přebytku vzduchu na konci ohniště
- $\Delta\alpha_0$ – změna přisávání v ohništi [2]
- $\Delta\alpha_{ml}$ – změna přisávání v mlýnici [2]
- $I''_{VZ \min}$ – entalpie minimálního množství horkého vzduchu $330 \text{ }^\circ\text{C}$
- $I'_{VZ \min}$ – entalpie minimálního množství nasávaného vzduchu $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn:

$$\bar{\psi} = x \cdot \xi = 0,95 \cdot 0,45 = 0,428 \quad (\text{Rov. 4-15})$$

- $x = 0,95$ – úhlový součinitel [2]
- $\xi = 0,45$ – součinitel zanášení stěn ohniště [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

4.3.3 *Stupeň černosti ohniště*

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{S_{vš}}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{S_{vš}}{S_{st}}\right)} \quad (\text{Rov. 4-16})$$

$$= \frac{0,812 + (1 - 0,812) \cdot \frac{44,401}{732,709}}{1 - (1 - 0,812) \cdot (1 - 0,428) \cdot \left(1 - \frac{44,401}{732,709}\right)} = 0,916$$

- a_{pl} – efektivní stupeň černosti plamene
 $S_{vš}$ – plocha výsypky škváry
 S_{st} – povrch stěn ohniště
 $\bar{\psi}$ – střední hodnota součinitele tepelné efektivnosti stěn

Efektivní stupeň černosti plamene:

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,572 \cdot 0,101 \cdot 6,43} = 0,812 \quad (\text{Rov. 4-17})$$

- k – součinitel zeslabení sálání
 p – tlak v ohništi
 s – účinná tloušťka sálavé vrstvy

Součinitel zeslabení sálání:

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,928 + 0,643 + 10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,1$$

$$= 2,572 \frac{1}{m \cdot MPa} \quad (\text{Rov. 4-18})$$

- $k_{sp} \cdot r_{sp}$ – součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
 $k_k = 1 \frac{1}{m \cdot MPa}$ – součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [2]
 $\kappa_1 = 1$ – určena podle druhu paliva [2]
 $\kappa_2 = 0,1$ – určena podle způsobu spalování [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny:

$$\begin{aligned}k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_o}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 6,43}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1170 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \\ &= 0,928 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned} \quad (\text{Rov. 4-19})$$

- r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} - celkový parciální tlak
 s - účinná tloušťka sálové vrstvy
 T_o - teplota na konci ohniště

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi:

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_o^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(1170 + 273,15)^2 \cdot 16^2}} \cdot 12,134 = 0,643 \frac{1}{m \cdot MPa} \quad (\text{Rov. 4-20})$$

- $d = 16 \mu m$ - střední efektivní průměr částicek popílku [2]
 μ - koncentrace popílku ve spalinách

Celkový parciální tlak:

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101 \cdot 0,3 = 0,03 MPa \quad (\text{Rov. 4-21})$$

- $p = 0,101 MPa$ - tlak za normálních podmínek
 r_{sp} - objemové části tříatomových plynů

Účinná tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{1308,681}{732,709} = 6,43 m \quad (\text{Rov. 4-22})$$

- V_o - objem ohniště
 S_{st} - povrch stěn ohniště

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

4.3.4 Teplota spalin na konci ohniště

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{\alpha_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1622,448 + 273,15}{1 + 0,342 \cdot \left(\frac{0,916}{1,07}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1171,687 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 4-23})$$

Vypočítaná teplota spalin na konci ohniště se od zvolené takřka neliší:

$$1170 \text{ } ^\circ\text{C} \cong 1171,687 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.4 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn

$$Q_S = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,993 \cdot (15132,481 - 10516,614) = 4585,084 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 4-24})$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště:

$$\bar{q} = \frac{M_{pv} \cdot Q_S}{F_{\dot{u}s}} = \frac{12,839 \cdot 4585,084}{289,089} = 203,639 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (\text{Rov. 4-25})$$

$F_{\dot{u}s}$ - účinná sálavá plocha stěn ohniště

Účinná sálavá plocha stěn ohniště:

$$F_{\dot{u}s} = \bar{\psi} \cdot (S_{tr} + S_{vo}) = 0,428 \cdot (638,123 + 50,185) = 289,089 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 4-26})$$

Tepelný tok na výstupní okno:

$$Q_{vo} = \bar{q} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{vo} = 203,639 \cdot 0,428 \cdot 50,185 = 4368,898 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 4-27})$$

Tepelný tok na trubky výparníku:

$$Q_{tr} = \bar{q} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{tr} = 203,639 \cdot 0,428 \cdot 638,123 = 59921,037 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 4-28})$$

5 NÁVRH KONVEKČNÍCH PLOCH

5.1 Zadané hodnoty

Při výpočtu jednotlivých konvekčních ploch se vychází z požadovaných parametrů výstupní přehřáté páry a zadaných parametrů vstupní napájecí vody. Kotel je navržen z konvekčních ploch: ekonomizéru (EKO), výparníku (VYP), stropního přehříváku páry (SPP), trubkového přehříváku páry (PP1), deskového přehříváku páry (PP2) a výstupního trubkového přehříváku páry (PP3). Pro výpočet teplot a entalpii vody a páry je použit program X Steam tables [5].

Množství přehřáté páry	M_{pp}	235	t/h
Výstupní teplota přehřáté páry	t_{pp}	540	$^{\circ}C$
Výstupní tlak přehřáté páry	p_{pp}	14	MPa
Vstupní teplota napájecí vody	t_{nv}	230	$^{\circ}C$
Vstupní tlak napájecí vody	p_{nv}	16,7	MPa

Tab. 5-1 Zadané hodnoty přehřáté páry a napájecí vody

5.2 Tlakové ztráty konvekčních ploch

V kotli dosahuje nejvyššího tlaku napájecí voda, její skutečný tlak na vstupu do ekonomizéru je od zadané hodnoty ještě snížen vlivem ztrát ve ventilech a napájecí hlavě. Následně se tlak snižuje v každé části kotle o jednotlivé navržené tlakové ztráty. Výsledný tlak musí být roven požadovanému tlaku přehřáté páry na výstupu z kotle.

Tlaková ztráta ekonomizéru	Δp_{EKO}	0,4	MPa
Tlaková ztráta stropního přehříváku	Δp_{SPP}	0,1	MPa
Tlaková ztráta prvního přehříváku páry (trubkový)	Δp_{PP1}	0,15	MPa
Tlaková ztráta druhého přehříváku páry (deskový)	Δp_{PP2}	0,2	MPa
Tlaková ztráta třetího přehříváku páry (trubkový – výstupní)	Δp_{PP3}	0,15	MPa

Tab. 5-2 Navržené tlakové ztráty

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

5.3 Tepelná bilance na straně média (voda/pára/vzduch)

5.3.1 Přehřívák páry (PP3)

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	p_{PP3}^{IN}	14,15	MPa	Tlak	p_{PP3}^{OUT}	14	MPa
Teplota	t_{PP3}^{IN}	437,99	°C	Teplota	t_{PP3}^{OUT}	540	°C
Entalpie	i_{PP3}^{IN}	3134,201	kJ/kg	Entalpie	i_{PP3}^{OUT}	3434,201	kJ/kg

Tab. 5-3 Parametry páry na vstupu a výstupu z PP3

Množství páry:

$$M_{PP3} = M_{pp} = 65,278 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 5-1})$$

Výkon přehříváku páry:

$$Q_{PP3} = M_{PP3} \cdot (i_{PP3}^{OUT} - i_{PP3}^{IN}) = 65,278 \cdot (3434,201 - 3134,201) = 19583,4 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-2})$$

5.3.2 Přehřívák páry (PP2)

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	p_{PP2}^{IN}	14,35	MPa	Tlak	p_{PP2}^{OUT}	14,15	MPa
Teplota	t_{PP2}^{IN}	380,78	°C	Teplota	t_{PP2}^{OUT}	458,78	°C
Entalpie	i_{PP2}^{IN}	2910,425	kJ/kg	Entalpie	i_{PP2}^{OUT}	3200,425	kJ/kg

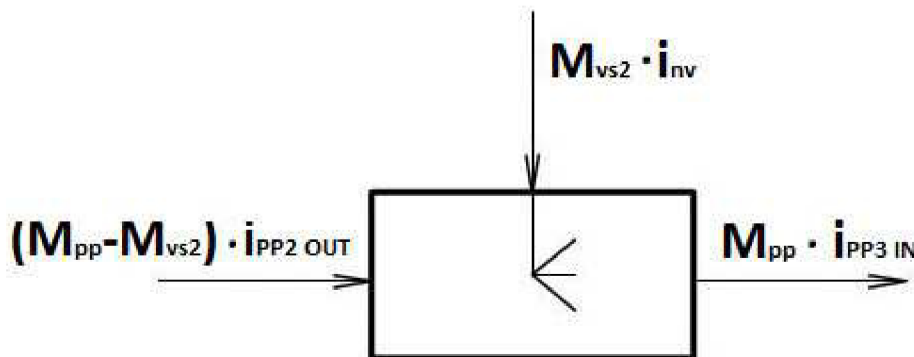
Tab. 5-4 Parametry páry na vstupu a výstupu z PP2

Množství páry:

$$M_{PP2} = M_{pp} - M_{vs2} = 65,278 - 1,958 = 63,32 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 5-3})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$$M_{vs2} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,03 \cdot 65,278 = 1,958 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-4})$$



Obr. 5-1 Vstřík napájecí vody mezi PP3 a PP2

Entalpie na výstupu:

$$i_{PP2}^{OUT} = \frac{M_{pp} \cdot i_{PP3}^{IN} - M_{vs2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{vs2}} = \frac{65,278 \cdot 3134,201 - 1,958 \cdot 992,958}{65,278 - 1,958} = 3200,425 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Rov. 5-5})$$

Výkon přehříváku páry:

$$Q_{PP2} = M_{PP2} \cdot (i_{PP2}^{OUT} - i_{PP2}^{IN}) = 63,32 \cdot (3200,425 - 2910,425) = 18362,7 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-6})$$

5.3.3 Přehřívák páry (PP1)

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	p_{PP1}^{IN}	14,5	MPa	Tlak	p_{PP1}^{OUT}	14,35	MPa
Teplota	t_{PP1}^{IN}	344,34	°C	Teplota	t_{PP1}^{OUT}	392,24	°C
Entalpie	i_{PP1}^{IN}	2676,150	kJ/kg	Entalpie	i_{PP1}^{OUT}	2961,150	kJ/kg

Tab. 5-5 Parametry páry na vstupu a výstupu z PP1

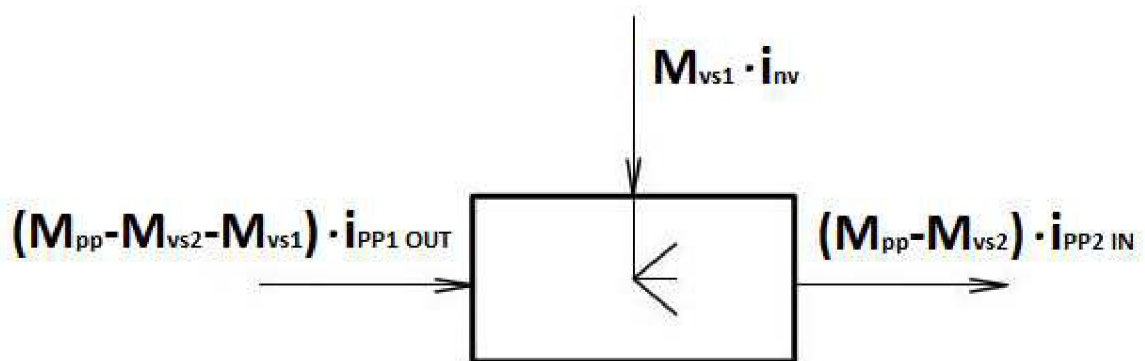
Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Množství páry:

$$M_{PP1} = M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1} = 65,278 - 1,958 - 1,632 = 61,688 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-7})$$

$$M_{vs2} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,03 \cdot 65,278 = 1,958 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-8})$$

$$M_{vs1} = 0,025 \cdot M_{pp} = 0,025 \cdot 65,278 = 1,632 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-9})$$



Obr. 5-2 Vstřík napájecí vody mezi PP2 a PP1

Entalpie na výstupu:

$$i_{PP1}^{OUT} = \frac{(M_{pp} - M_{vs2}) \cdot i_{PP2}^{IN} - M_{vs1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}} = \frac{63,32 \cdot 2910,425 - 1,632 \cdot 992,958}{65,278 - 1,958 - 1,632} \quad (\text{Rov. 5-10})$$

$$= 2961,150 \frac{kJ}{kg}$$

Výkon přehříváku páry:

$$Q_{PP1} = M_{PP1} \cdot (i_{PP1}^{OUT} - i_{PP1}^{IN}) = 61,688 \cdot (2961,150 - 2676,150) = 17581,0 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-11})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

5.3.4 Stropní přehřívák páry (SPP)

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	p_{SPP}^{IN}	14,6	MPa	Tlak	p_{SPP}^{OUT}	14,5	MPa
Teplota	t_{SPP}^{IN}	340	°C	Teplota	t_{SPP}^{OUT}	344,34	°C
Entalpie	i_{SPP}^{IN}	2622,072	$\frac{kJ}{kg}$	Entalpie	i_{SPP}^{OUT}	2676,150	$\frac{kJ}{kg}$

Tab. 5-6 Parametry páry na vstupu a výstupu z SPP

Množství páry:

$$M_{SPP} = M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1} = 65,278 - 1,958 - 1,632 = 61,688 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-12})$$

$$M_{vs2} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,03 \cdot 65,278 = 1,958 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-13})$$

$$M_{vs1} = 0,025 \cdot M_{pp} = 0,025 \cdot 65,278 = 1,632 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-14})$$

Entalpie na výstupu:

$$i_{SPP}^{OUT} = i_{PP1}^{IN} = 2676,150 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Rov. 5-15})$$

Výkon stropního přehříváku páry:

$$Q_{SPP} = M_{SPP} \cdot (i_{SPP}^{OUT} - i_{SPP}^{IN}) = 61,688 \cdot (2676,150 - 2622,072) = 3336,0 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-16})$$

5.3.5 Výparník (VÝP)

Výparník je složen z výparných trubek na stěnách ohniště, bočních stěn a výparné mříže. Boční stěny jsou tvořeny výparnými trubkami a jde o vedlejší plochy kolem přehříváku PP2 a PP3. Výparná mříž převádí parovodní směs napříč spalínovým kanálem do bubnu.

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Teplota na vstupu do výparníku je snížena o nedohřev a to proto, aby do výparníku vstupovala voda a nikoliv parovodní směs. Nedohřev je volen 49 °C.

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	$p_{VÝP}^{IN}$	14,6	MPa	Tlak	$p_{VÝP}^{OUT}$	14,6	MPa
Teplota	$t_{VÝP}^{IN}$	291	°C	Teplota	$t_{VÝP}^{OUT}$	340	°C
Entalpie	$i_{VÝP}^{IN}$	1289,984	kJ/kg	Entalpie	$i_{VÝP}^{OUT}$	2622,072	kJ/kg

Tab. 5-7 Parametry páry a syté kapaliny na vstupu a výstupu z VÝP

Množství napájecí vody:

$$M_{VÝP} = M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1} = 65,278 - 1,958 - 1,632 = 61,688 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-17})$$

$$M_{vs2} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,03 \cdot 65,278 = 1,958 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-18})$$

$$M_{vs1} = 0,025 \cdot M_{pp} = 0,025 \cdot 65,278 = 1,632 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-19})$$

Výkon výparníku:

$$Q_{VÝP} = M_{VÝP} \cdot (i_{VÝP}^{OUT} - i_{VÝP}^{IN}) = 61,688 \cdot (2622,072 - 1289,984) = 82173,5 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-20})$$

5.3.6 Ekonomizér (EKO)

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Tlak	p_{EKO}^{IN}	15	MPa	Tlak	p_{EKO}^{OUT}	14,6	MPa
Teplota	t_{EKO}^{IN}	230	°C	Teplota	t_{EKO}^{OUT}	291	°C
Entalpie	i_{EKO}^{IN}	992,985	kJ/kg	Entalpie	i_{EKO}^{OUT}	1289,984	kJ/kg

Tab. 5-8 Parametry vody na vstupu a výstupu z EKO

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Množství napájecí vody:

$$M_{EKO} = M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1} = 65,278 - 1,958 - 1,632 = 61,688 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-21})$$

$$M_{vs2} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,03 \cdot 65,278 = 1,958 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-22})$$

$$M_{vs1} = 0,025 \cdot M_{pp} = 0,025 \cdot 65,278 = 1,632 \frac{kg}{s} \quad (\text{Rov. 5-23})$$

Výkon ekonomizéru:

$$Q_{EKO} = M_{EKO} \cdot (i_{EKO}^{OUT} - i_{EKO}^{IN}) = 61,688 \cdot (1289,984 - 992,985) = 18321,1 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-24})$$

5.3.7 Ohřívák vzduchu (OVZ)

Vzduch pro spalování je ohříván regeneračním ohřívákem typu Ljungström. Teplota vzduchu na vstupu je předehřátá kaloriferem na 60 °C, z důvodu ochrany před nízkoteplotní korozi.

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota	t_{OVZ}^{IN}	60	°C	Teplota	t_{OVZ}^{OUT}	330	°C
Entalpie	i_{OVZ}^{IN}	452,521	kJ/kg	Entalpie	i_{OVZ}^{OUT}	1720,216	kJ/kg

Tab. 5-9 Parametry vody na vstupu a výstupu z OVZ

Výkon ohříváku vzduchu:

$$Q_{OVZ} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{OVZ}^{OUT} - i_{OVZ}^{IN}) = 12,839 \cdot 1,25 \cdot (1720,216 - 452,521) = 20344,9 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 5-25})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

5.3.8 Celkový potřebný tepelný výkon

$$\begin{aligned}
 Q_C &= Q_{PP3} + Q_{PP2} + Q_{PP1} + Q_{SPP} + Q_{VÝP} + Q_{EKO} \\
 &= 19583,4 + 18362,7 + 17581 + 3336 + 82173,5 + 18321,1 \\
 &= 159357,7 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \quad (\text{Rov. 5-26})$$

5.3.9 Přehled vypočtených parametrů

Konvekční plocha		Tlak	Teplota	Entalpie	Tepelný výkon
		[MPa]	[°C]	[kJ/kg]	[kW]
PP3	výstup	14	540	3434,201	19583,4
	vstup	14,15	437,99	3134,201	
PP2	výstup	14,15	458,78	3200,425	18362,7
	vstup	14,35	380,78	2910,425	
PP1	výstup	14,35	392,24	2961,150	17581
	vstup	14,5	344,34	2676,150	
SPP	výstup	14,5	344,34	2676,150	3336
	vstup	14,6	340	2622,072	
VÝP	výstup	14,6	340	2622,072	82173,5
	vstup	14,6	340	1289,984	
EKO	výstup	14,6	291	1289,984	18321,1
	vstup	15	230	992,985	

Tab. 5-10 Parametry média (voda/pára)

5.4 Tepelná bilance na straně spalin

Parametry spalin na vstupu i výstupu na jednotlivých konvekčních plochách, určíme z níže uvedené předlohy výpočtu. Výsledné hodnoty entalpii převedeme aproximací z tab. 2-5 na teploty spalin. Přičemž platí, že teplota spalin na vstupu do přehříváku páry PP2 je rovna

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

teplotě spalin na konci ohniště. Výstupní teplota spalin z kotle musí, kvůli ochraně před nízkoteplotní korozi, dosahovat minimální hodnoty 155 °C.

$$i_i^{IN} = \frac{Q_i + (M_{pv} \cdot i_i^{OUT})}{M_{pv}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \rightarrow t_i^{IN} [^{\circ}C] \quad (\text{Rov. 5-27})$$

- i - počítaná konvekční plocha
 Q_i - teplo odebrané počítanou konvekční plochou

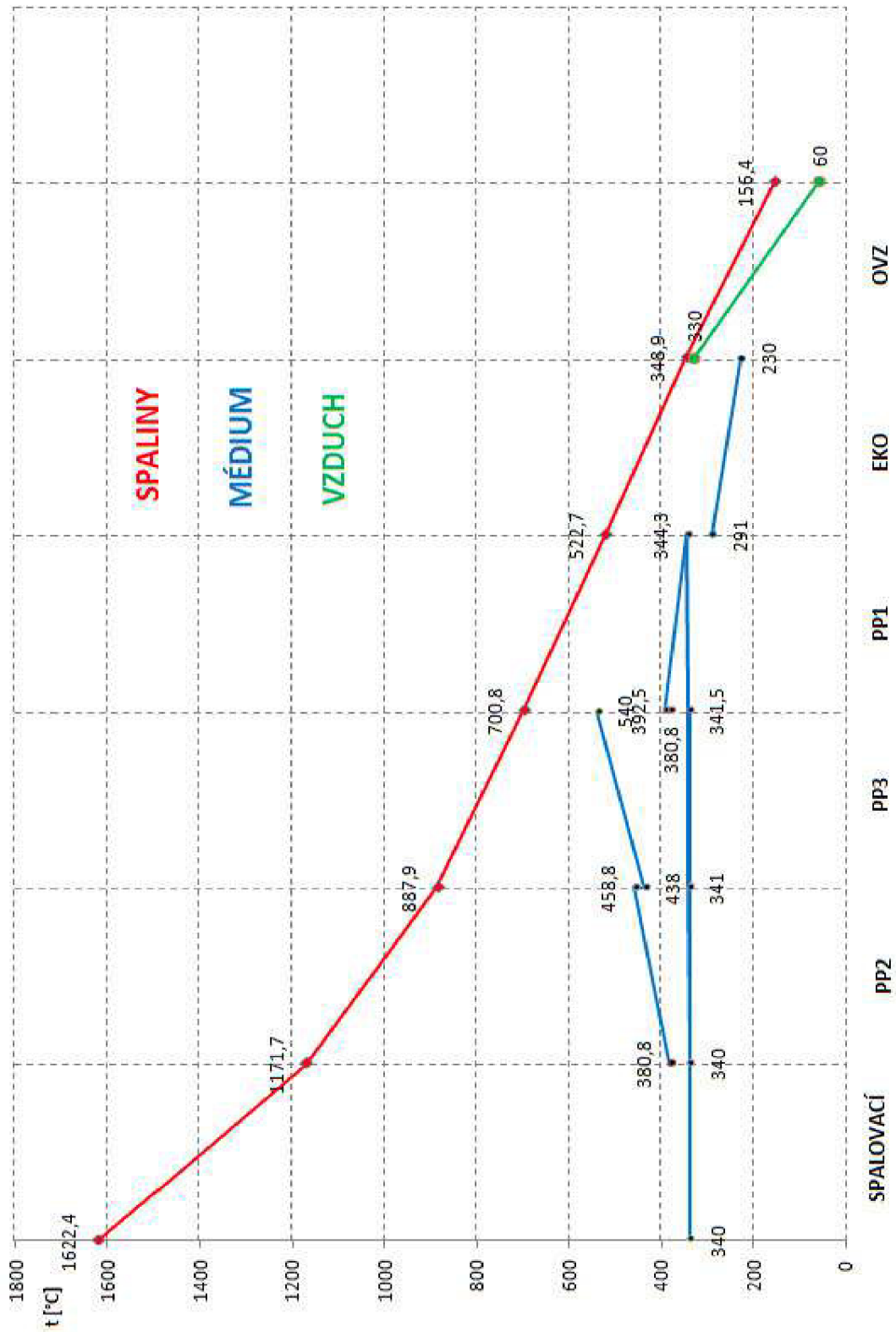
5.4.1 Přehled vypočtených parametrů

Konvekční plocha		Teplota	Entalpie
		[°C]	[kJ/kg]
PP2	výstup	887,9	7744,464
	vstup	1171,7	10577,57
PP3	výstup	700,8	5975,434
	vstup	887,9	7744,464
PP1	výstup	522,7	4357,759
	vstup	678,5	5770,292
EKO	výstup	348,9	2840,020
	vstup	512,0	4262,358
OVZ	výstup	155,6	1236,027
	vstup	348,9	2840,020

Tab. 5-11 Parametry spalin

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

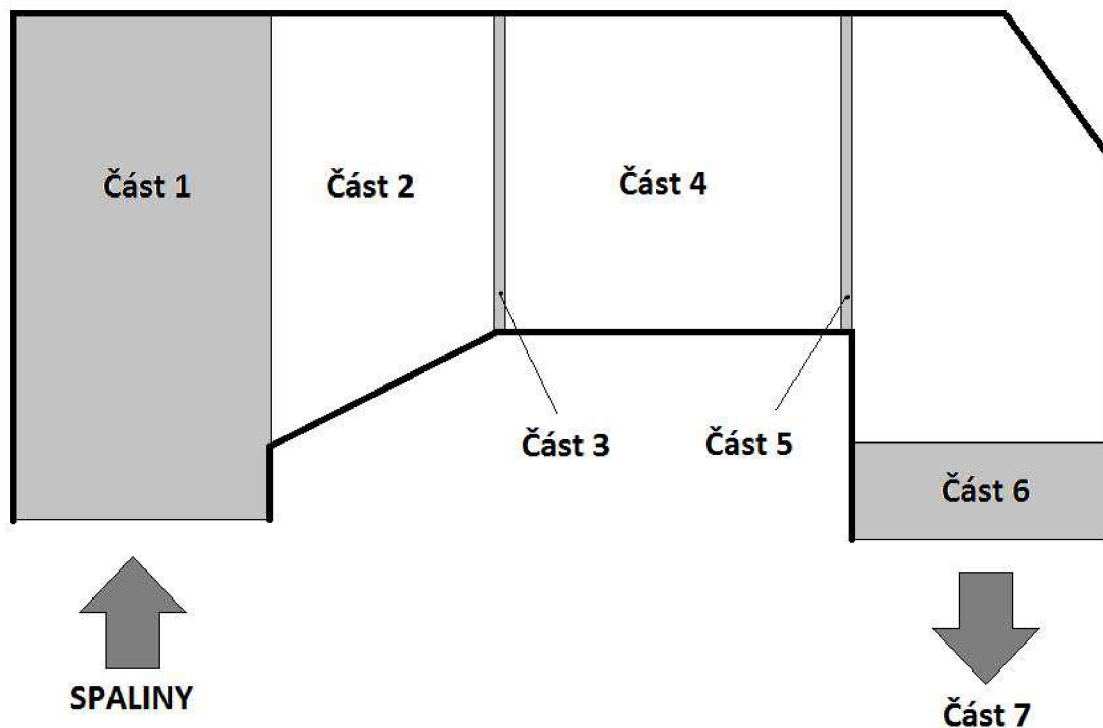
5.5 Pilový diagram



Obr. 5-3 Pilový diagram

6 ROZVRŽENÍ VÝPOČTU JEDNOTLIVÝCH KONVEKČNÍCH PLOCH

Následující výpočet konvekčních ploch bude rozdělen do několika částí, v každé z nich bude řešen přestup tepla konvekcí či sáláním a budou zahrnovat jak hlavní konvekční plochy, tak i vedlejší plochy. Celý výpočet začíná na konci spalovací komory, kde dál do spalínového kanálu proudí spaliny o vstupní teplotě rovné teplotě spalin na konci ohniště. Spaliny při průchodu jednotlivými částmi odevzdávají svou tepelnou energii a postupně chladnou až na požadovanou teplotu na výstupu (tj. 155 °C).



Obr. 6-1 Rozdělení spalínového kanálu

- Spalínový kanál - část 1:**
- deskový přehřívák páry (PP2)
 - první úsek stropního přehříváku páry (SPP)
 - výparné trubky po stěnách (VÝP)
- Spalínový kanál - část 2:**
- výstupní trubkový přehřívák páry (PP3)
 - druhý úsek stropního přehříváku páry (SPP)
 - výparné trubky na šikmém dnu (VÝP)
 - výparné trubky po stěnách (VÝP)

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

- Spalinový kanál - část 3:** - mříž (VÝP)
- třetí úsek stropního přehříváku páry (SPP)
- Spalinový kanál - část 4:** - trubkový přehřívák páry (PP1)
- čtvrtý úsek stropního přehříváku páry (SPP)
- šestý úsek stropního přehříváku páry (SPP)
- Spalinový kanál - část 5:** - mříž - pátý úsek stropního přehříváku páry (SPP)
- Spalinový kanál - část 6:** - ekonomizér (EKO)
- Spalinový kanál - část 7:** - ohřívák vzduchu (OVZ)

7 SPALINOVÝ KANÁL - ČÁST 1

Geometrie spalinového kanálu

Šířka spalinového kanálu: $A = 5,527 \text{ m}$

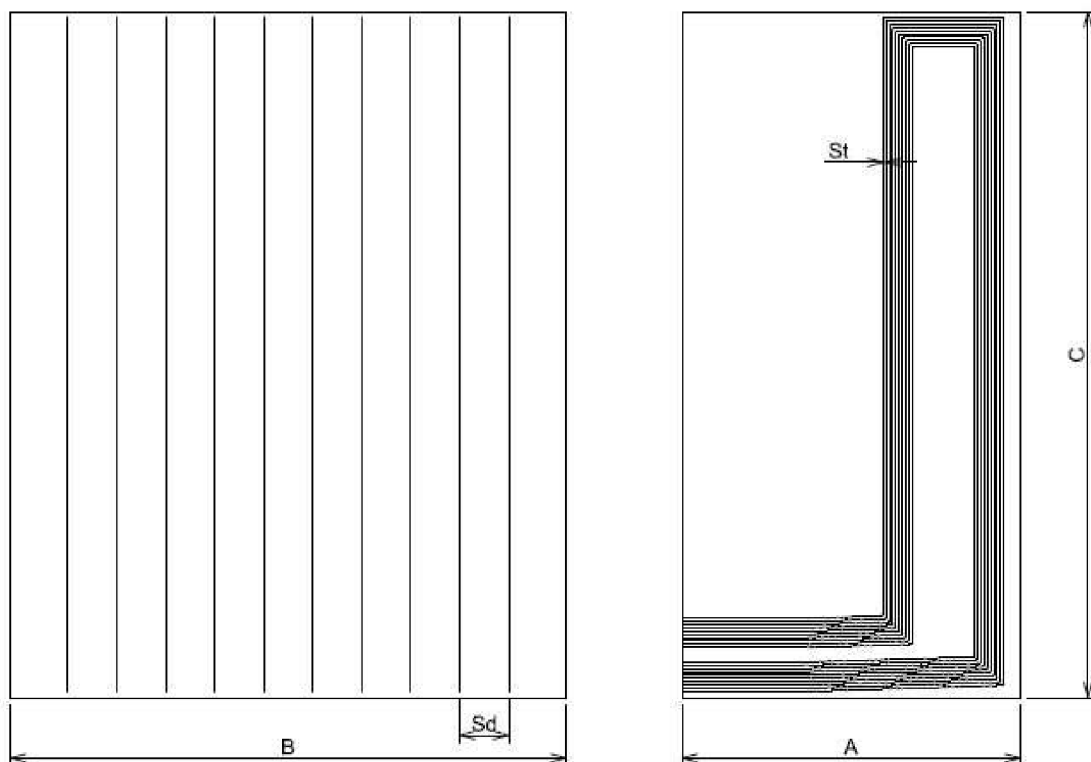
Hloubka spalinového kanálu: $B = 9,08 \text{ m}$

Výška spalinového kanálu: $C = 11,2 \text{ m}$

7.1 Deskový přehřívák páry (PP2)

Jedná se o svislé rovnoběžně uspořádané desky (tvořeny svinutými hady trubek) v souproutém zapojení.

7.1.1 Geometrie deskového přehříváku



Obr. 7-1 Geometrie deskového přehříváku PP2

Geometrie trubek a desek

Vnější průměr trubky: $D = 0,0381 \text{ m}$

Tloušťka stěny trubky: $t = 0,00563 \text{ m}$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,02684 \text{ m}$
Rozteč trubek:	$s_t = 0,053 \text{ m}$
Délka hadu trubek:	$l = 31,85 \text{ m}$
Rozteč desek:	$s_d = 0,8 \text{ m}$
Počet desek:	$n_d = 10$
Počet trubek v desce:	$n_t = 10$

Plocha desek

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot x \cdot n_t \cdot n_d = \pi \cdot 0,0381 \cdot 31,85 \cdot 0,98 \cdot 10 \cdot 10 = 373,603 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-1})$$

x - úhlový součinitel desek

7.1.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	380,784	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	458,778	°C
Měrný objem páry	v_p^{IN}	0,0154	m^3/kg	Měrný objem páry	v_p^{OUT}	0,0203	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	1171,687	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	887,908	°C

Tab. 7-1 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{380,784 + 458,778}{2} = 419,781 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-2})$$

Střední měrný objem páry

$$v_p^{STŘ} = \frac{v_p^{IN} + v_p^{OUT}}{2} = \frac{0,0154 + 0,0203}{2} = 0,01785 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 7-3})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{1171,687 + 887,908}{2} = 1029,797 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-4})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = A \cdot C - n_d \cdot 5,224 \cdot D = 5,527 \cdot 11,2 - 10 \cdot 5,224 \cdot 0,0381 = 48,195 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-5})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STR}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{48,195} \cdot \frac{273,15 + 1029,797}{273,15} = 7,219 \frac{m}{s} \quad (\text{Rov. 7-6})$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{PP2} \cdot v_p^{STR}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_t \cdot n_d} = \frac{4 \cdot 63,32 \cdot 0,01785}{\pi \cdot 0,02684^2 \cdot 10 \cdot 10} = 20,049 \frac{m}{s} \quad (\text{Rov. 7-7})$$

7.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 48,195}{2 \cdot (5,527 + 9,08)} = 6,599 \text{ m} \quad (\text{Rov. 7-8})$$

Poměrný objem vodní páry

$$O_{H_2O} = \frac{O_{H_2O \text{ min}} + (\alpha - 1) \cdot (f - 1) \cdot O_{SP \text{ min}}}{O_{SP}} = \frac{0,99 + (1,25 - 1) \cdot (1,027 - 1) \cdot 4,699}{5,681} = 0,18 \quad (\text{Rov. 7-9})$$

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [2]

$$\lambda = 117,266 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]

$$\nu = 185,326 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]

$$Pr = 0,599$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{př} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 0,223 \cdot \frac{117,266 \cdot 10^{-3}}{0,0381} \cdot \left(\frac{7,219 \cdot 0,0381}{185,326 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,599^{0,33} \quad (\text{Rov. 7-10}) \\ &= 13,572 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned}\alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{117,266 \cdot 10^{-3}}{6,599} \cdot \left(\frac{7,219 \cdot 6,599}{185,326 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 0,599^{0,4} \quad (\text{Rov. 7-11}) \\ &= 7,086 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}\end{aligned}$$

7.1.4 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry*

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné proudění

$$\begin{aligned}\alpha_{kp}^{př} &= 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{76,631 \cdot 10^{-3}}{0,02684} \cdot \left(\frac{20,049 \cdot 0,02684}{4,583 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,195^{0,4} \quad (\text{Rov. 7-12}) \\ &= 5059,304 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}\end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Součinitel tepelné vodivosti páry [5]	$\lambda = 76,631 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity páry [5]	$\nu = 4,583 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Součinitel dynamické viskozity páry [5]	$\eta = 2,571 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Prandtlovo číslo páry [5]	$Pr = 1,195$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné proudění [2]

$$\alpha_{kp}^{pod} = 4275 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

7.1.5 *Součinitel přestupu tepla sáláním*

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,247 \cdot (1171,687 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{444,781 + 273,15}{1171,687 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{444,781 + 273,15}{1171,687 + 273,15}\right)} \quad (\text{Rov. 7-13}) \\ &= 69,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}\end{aligned}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,288 \cdot 0,1 \cdot 1,241} = 0,247 \quad (\text{Rov. 7-14})$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned} k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 1,241}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1171,687 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \\ &= 2,288 \frac{1}{m \cdot MPa} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 7-15})$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 7-16})$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_t \cdot s_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0381 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,053 \cdot 0,8}{0,0381^2} - 1 \right) = 1,241 \text{ m} \quad (\text{Rov. 7-17})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 419,781 + 25 = 444,781 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-18})$$

7.1.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = k_k + \alpha_s = 10,598 + 69,9 = 80,498 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 7-19})$$

Součinitel prostupu tepla – příčné proudění

$$k_{př} = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ks}^{př}} + \frac{1}{\alpha_{kp}^{př}}} = 0,94 \cdot \frac{1}{\frac{1}{13,572} + \frac{1}{5059,304}} = 12,723 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 7-20})$$

$\psi = 0,94$ (*voleno*) - součinitel tepelné efektivity

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel prostupu tepla – podélné proudění

$$k_{pod} = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ks}^{pod}} + \frac{1}{\alpha_{kp}^{pod}}} = 0,94 \cdot \frac{1}{\frac{1}{7,086} + \frac{1}{4275}} = 6,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 7-21})$$

Součinitel prostupu tepla konvekcí

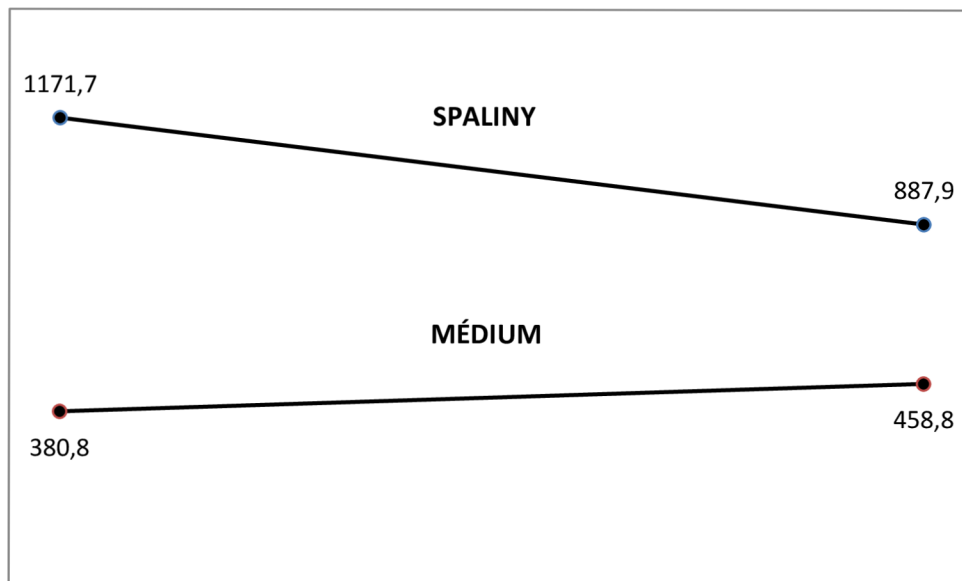
$$k_k = \frac{k_{př} \cdot S_{př} + k_{pod} \cdot S_{pod}}{S} = \frac{12,723 \cdot 242,842 + 6,65 \cdot 130,761}{373,603} = 10,598 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 7-22})$$

$$S_{př} = 0,65 \cdot S = 0,65 \cdot 373,603 = 242,842 \text{ m}^2 \quad \text{- plocha obtékaná příčně}$$

$$S_{pod} = 0,35 \cdot S = 0,35 \cdot 373,603 = 130,761 \text{ m}^2 \quad \text{- plocha obtékaná podélně}$$

Teplotní spád

$$\Delta t = t_s^{STR} - t_p^{STR} = 1029,797 - 419,781 = 610,016 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-23})$$



Obr. 7-2 Schéma teplotního spádu PP2

7.1.7 Tepelný výkon PP2

$$Q_{PP2}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 373,603 \cdot 10,598 \cdot 610,016 \cdot 10^{-3} = 240,456 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 7-24})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Kontrola výpočtu PP2

$$\Delta Q = \frac{Q_{PP2} - Q_{PP2}^{skut}}{Q_{PP2}} \cdot 100 = \frac{18362,7 - 18345,67}{18362,7} \cdot 100 = 0,092 \% \quad (\text{Rov. 7-25})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.2 První úsek stropního přehříváku páry (SPP)

7.2.1 Geometrie stropního přehříváku

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek:	$s_t = 0,16 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 56$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_t = \pi \cdot 0,0603 \cdot 5,527 \cdot 56 = 58,633 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-26})$$

7.2.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	340,004	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	341	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	1171,687	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	887,908	°C

Tab. 7-2 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{340,004 + 341}{2} = 340,502 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-27})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{1171,687 + 887,908}{2} = 1029,797 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-28})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = A \cdot C - n_t \cdot A \cdot D = 5,527 \cdot 11,2 - 56 \cdot 5,527 \cdot 0,0603 = 31,522 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-29})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.2.3 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalín*

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 31,522}{2 \cdot (5,527 + 9,08)} = 4,316 \text{ m} \quad (\text{Rov. 7-30})$$

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 117,266 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 185,326 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,599$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{117,266 \cdot 10^{-3}}{4,316} \cdot \left(\frac{7,219 \cdot 4,316}{185,326 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,599^{0,4} \quad (\text{Rov. 7-31}) \\ &= 7,714 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

7.2.4 *Součinitel přestupu tepla sáláním*

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,091 \cdot (1171,687 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{365,502 + 273,15}{1171,687 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{365,502 + 273,15}{1171,687 + 273,15} \right)} \quad (\text{Rov. 7-32}) \\ &= 23,889 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-7,388 \cdot 0,1 \cdot 0,129} = 0,091 \quad (\text{Rov. 7-33})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,129}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1171,687 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 7-34}) \\ &= 7,388 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 7-35})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_t \cdot s_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0603}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,129 \text{ m} \quad (\text{Rov. 7-36})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STŘ} + \Delta t = 340,502 + 25 = 365,502 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-37})$$

7.2.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (7,714 + 23,889) = 29,707 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 7-38})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 1171,687 - 340,004 = 831,683 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-39})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 887,908 - 341 = 546,908 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-40})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{831,683 - 546,908}{\ln\left(\frac{831,683}{546,908}\right)} = 679,377 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-41})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.2.6 *Tepelný výkon SPP1*

$$Q_{SPP1}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 58,633 \cdot 29,707 \cdot 679,377 \cdot 10^{-3} = 1183,366 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 7-42})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.3 Výparné trubky po stěnách (VÝP)

7.3.1 Geometrie výparných trubek

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky: $D = 0,0603 \text{ m}$
 Tloušťka stěny trubky: $t = 0,0062 \text{ m}$
 Vnitřní průměr trubky: $d = 0,0479 \text{ m}$
 Počet trubek: $n_t = 124$

Plocha trubek

$$S = 2 \cdot A \cdot C + B \cdot C + B \cdot 0,723 = 2 \cdot 5,527 \cdot 11,2 + 9,08 \cdot 11,2 + 9,08 \cdot 0,723 = 232,066 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-43})$$

7.3.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	291,004	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	340,004	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	1171,687	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	887,908	°C

Tab. 7-3 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{291,004 + 340,004}{2} = 315,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-44})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{1171,687 + 887,908}{2} = 1029,797 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-45})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = S - D \cdot C \cdot n_t - 0,723 \cdot 56 \cdot D = 232,066 - 0,0603 \cdot 11,2 \cdot 124 - 0,723 \cdot 56 \cdot 0,0603 = 145,88 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 7-46})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

7.3.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalín

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 145,88}{2 \cdot (5,527 + 9,08)} = 19,974 \text{ m} \quad (\text{Rov. 7-47})$$

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 117,266 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 185,326 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,599$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{117,266 \cdot 10^{-3}}{19,974} \cdot \left(\frac{7,219 \cdot 19,974}{185,326 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,599^{0,4} \\ &= 5,678 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 7-48})$$

7.3.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,407 \cdot (1171,687 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{1171,687 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{1171,687 + 273,15} \right)} \quad (\text{Rov. 7-49}) \\ &= 104,421 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,104 \cdot 0,1 \cdot 4,733} = 0,407 \quad (\text{Rov. 7-50})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned} k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 4,733}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1171,687 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 7-51}) \\ &= 1,104 \frac{1}{m \cdot MPa} \end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 7-52})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$\begin{aligned} s &= 3,6 \cdot \left(\frac{A \cdot B \cdot C}{2 \cdot A \cdot B + 2 \cdot A \cdot C + 2 \cdot B \cdot C} \right) \\ &= 3,6 \cdot \left(\frac{5,527 \cdot 9,08 \cdot 11,2}{2 \cdot 5,527 \cdot 9,08 + 2 \cdot 5,527 \cdot 11,2 + 2 \cdot 9,08 \cdot 11,2} \right) \quad (\text{Rov. 7-53}) \\ &= 4,733 \text{ m} \end{aligned}$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 315,504 + 25 = 340,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-54})$$

7.3.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (5,678 + 104,421) = 103,493 \text{ W/m}^2 \cdot K \quad (\text{Rov. 7-55})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 1171,687 - 291,004 = 880,683 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-56})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 887,908 - 340,004 = 547,904 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 7-57})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{880,683 - 547,904}{\ln\left(\frac{880,683}{547,904}\right)} = 701,181 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7-58})$$

7.3.6 Tepelný výkon VÝP1

$$Q_{VÝP1}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 232,066 \cdot 103,493 \cdot 701,181 \cdot 10^{-3} = 16840,43 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 7-59})$$

8 SPALINOVÝ KANÁL - ČÁST 2

Geometrie spalinového kanálu

Šířka spalinového kanálu: $A = 2,8 \text{ m}$

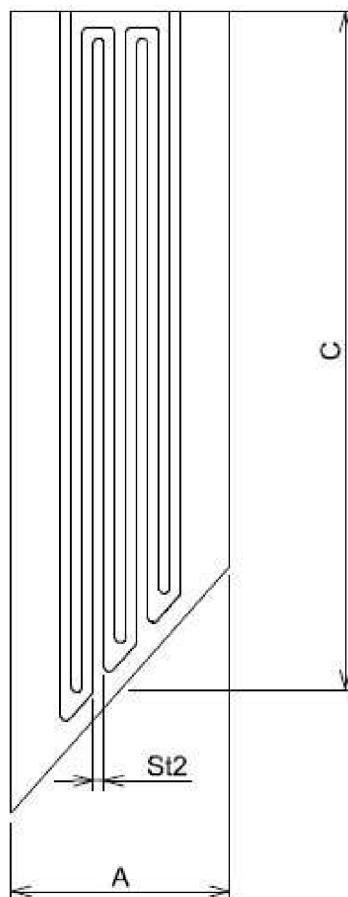
Hloubka spalinového kanálu: $B = 9,08 \text{ m}$

Střední výška spalinového kanálu: $C = 8,286 \text{ m}$

8.1 Výstupní přehřívák páry (PP3)

Trubky přehříváku jsou tažené dvojité po šířce kanálu v souproutém zapojení. Tito dvoj-hadi jsou uspořádáni za sebou v dané rozteči.

8.1.1 Geometrie přehříváku



Obr. 8-1 Geometrie výstupního přehříváku PP3

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0381 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,00563 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,02684 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru hloubky:	$s_{t1} = 0,16 \text{ m}$
Délka hadu trubek:	$l = 51,216 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru šířky:	$s_{t2} = 0,14 \text{ m}$
Počet řad:	$n_{\check{r}} = 56$
Počet trubek:	$n_t = 2$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_t \cdot n_{\check{r}} = \pi \cdot 0,0381 \cdot 51,216 \cdot 2 \cdot 56 = 686,592 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-1})$$

8.1.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	437,994	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	540	°C
Měrný objem páry	v_p^{IN}	0,0192	m^3/kg	Měrný objem páry	v_p^{OUT}	0,0243	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	887,957	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	700,9	°C

Tab. 8-1 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{ST\check{R}} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{437,994 + 540}{2} = 488,997 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-2})$$

Střední měrný objem páry

$$v_p^{ST\check{R}} = \frac{v_p^{IN} + v_p^{OUT}}{2} = \frac{0,0192 + 0,0243}{2} = 0,02177 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 8-3})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{ST\check{R}} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{887,957 + 700,9}{2} = 794,428 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-4})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_{\text{ř}} \cdot C \cdot D = 9,08 \cdot 8,286 - 56 \cdot 8,286 \cdot 0,0381 = 57,558 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-5})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STR}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{57,558} \cdot \frac{273,15 + 794,428}{273,15} = 4,953 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 8-6})$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{PP3} \cdot v_p^{STR}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_t \cdot n_{\text{ř}}} = \frac{4 \cdot 65,278 \cdot 0,02177}{\pi \cdot 0,02684^2 \cdot 2 \cdot 56} = 22,429 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 8-7})$$

8.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 95,448 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 133,277 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,623$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{př} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1,433 \cdot \frac{95,448 \cdot 10^{-3}}{0,0381} \cdot \left(\frac{4,953 \cdot 0,0381}{133,277 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,623^{0,33} \quad (\text{Rov. 8-8}) \\ &= 68,601 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

8.1.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné proudění

$$\begin{aligned} \alpha_{kp}^{př} &= 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{79,264 \cdot 10^{-3}}{0,02684} \cdot \left(\frac{22,429 \cdot 0,02684}{6,256 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,046^{0,4} \quad (\text{Rov. 8-9}) \\ &= 4231,322 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry [5]	$\lambda = 79,264 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity páry [5]	$\nu = 6,256 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Součinitel dynamické viskozity páry [5]	$\eta = 2,873 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Prandtlovo číslo páry [5]	$Pr = 1,046$

8.1.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,224 \cdot (887,956 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{513,997 + 273,15}{887,956 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{513,997 + 273,15}{887,956 + 273,15}\right)} = \quad (\text{Rov. 8-10})$$

$$= 42,145 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3,974 \cdot 0,1 \cdot 0,639} = 0,224 \quad (\text{Rov. 8-11})$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,639}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{887,956 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 8-12})$$

$$= 3,974 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 8-13})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_{t1} \cdot s_{t2}}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0381 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,14}{0,0381^2} - 1 \right) = 0,639 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-14})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STŘ} + \Delta t = 488,997 + 25 = 513,997 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-15})$$

8.1.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot (\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s)}{\left(1 + \frac{\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s}{\alpha_{kp}^{př}} \right)} = \frac{0,94 \cdot (68,601 + 42,145)}{\left(1 + \frac{68,601 + 42,145}{4231,322} \right)} = 101,447 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 8-16})$$

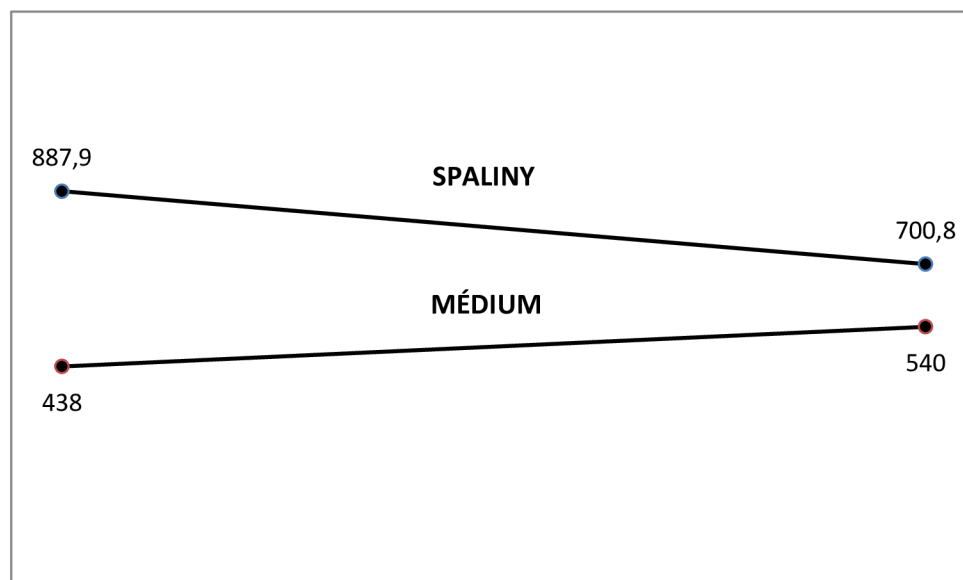
$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 887,957 - 437,994 = 449,963 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-17})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 700,9 - 540 = 160,9 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-18})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{449,963 - 160,9}{\ln \left(\frac{449,963}{160,9} \right)} = 281,085 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-19})$$



Obr. 8-2 Schéma teplotního spádu PP3

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.1.7 Tepelný výkon PP3

$$Q_{PP3}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 686,592 \cdot 101,447 \cdot 281,085 \cdot 10^{-3} = 19578,22 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 8-20})$$

Kontrola výpočtu PP3

$$\Delta Q = \frac{Q_{PP3} - Q_{PP3}^{skut}}{Q_{PP3}} \cdot 100 = \frac{19583,4 - 19578,22}{19583,4} \cdot 100 = 0,026 \% \quad (\text{Rov. 8-21})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.2 Druhý úsek stropního přehříváku páry (SPP)

8.2.1 Geometrie stropního přehříváku

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek:	$s_t = 0,16 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 56$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_t = \pi \cdot 0,0603 \cdot 2,8 \cdot 56 = 29,704 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-22})$$

8.2.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	341	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	341,5	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	887,957	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	700,9	°C

Tab. 8-2 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{341 + 341,5}{2} = 341,25 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-23})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{887,957 + 700,9}{2} = 794,428 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-24})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = A \cdot B - n_t \cdot A \cdot D = 2,8 \cdot 9,08 - 56 \cdot 2,8 \cdot 0,0603 = 15,969 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-25})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.2.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalín

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 15,969}{2 \cdot (2,8 + 9,08)} = 2,688 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-26})$$

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 95,448 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 133,277 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,623$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{95,448 \cdot 10^{-3}}{2,688} \cdot \left(\frac{4,953 \cdot 2,688}{133,277 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,623^{0,4} \\ &= 6,753 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-27})$$

8.2.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,11 \cdot (887,957 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{366,25 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{366,25 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)} = \\ &= 17,413 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-28})$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9,055 \cdot 0,1 \cdot 0,129} = 0,11 \quad (\text{Rov. 8-29})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,129}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{887,957 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 8-30}) \\ &= 9,055 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 8-31})$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_t \cdot S_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0603}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,129 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-32})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STŘ} + \Delta t = 341,25 + 25 = 366,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-33})$$

8.2.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (6,753 + 17,413) = 22,716 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 8-34})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 887,957 - 341 = 546,957 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-35})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 700,9 - 341,5 = 359,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-36})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{546,957 - 359,4}{\ln\left(\frac{546,957}{359,4}\right)} = 446,634 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-37})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.2.6 *Tepelný výkon SPP2*

$$Q_{SPP2}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 29,704 \cdot 22,716 \cdot 446,634 \cdot 10^{-3} = 301,362 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 8-38})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.3 Výparné trubky na šikmém dnu (VÝP)

8.3.1 Geometrie výparných trubek

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Délka šikmého dna:	$l = 4,219 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 56$

Plocha trubek

$$S = B \cdot l = 9,08 \cdot 4,219 = 38,309 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-39})$$

8.3.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	291,004	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	340,004	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	887,957	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	700,9	°C

Tab. 8-3 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{291,004 + 340,004}{2} = 315,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-40})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{887,957 + 700,9}{2} = 794,428 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-41})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot l - n_t \cdot D = 9,08 \cdot 4,219 - 56 \cdot 0,0603 = 34,932 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-42})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.3.3 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalín*

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (l + B)} = \frac{4 \cdot 34,932}{2 \cdot (4,219 + 9,08)} = 5,253 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-43})$$

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [1] $\lambda = 95,448 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [1] $\nu = 133,277 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [1] $Pr = 0,623$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{95,448 \cdot 10^{-3}}{5,253} \cdot \left(\frac{4,953 \cdot 5,253}{133,277 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,623^{0,4} \\ &= 5,906 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-44})$$

8.3.4 *Součinitel přestupu tepla sáláním*

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,44 \cdot (887,957 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)} = \\ &= 67,337 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-45})$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,536 \cdot 0,1 \cdot 3,77} = 0,44 \quad (\text{Rov. 8-46})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}
 k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 3,77}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{887,957 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 8-47}) \\
 &= 1,536 \frac{1}{m \cdot MPa}
 \end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 8-48})$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \left(\frac{A \cdot B \cdot 3,156}{2 \cdot B \cdot l} \right) = 3,6 \cdot \left(\frac{2,8 \cdot 9,08 \cdot 3,156}{2 \cdot 9,08 \cdot 4,219} \right) = 3,77 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-49})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 315,504 + 25 = 340,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-50})$$

8.3.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (5,906 + 67,337) = 68,848 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 8-51})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 887,957 - 291,004 = 596,953 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-52})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 700,9 - 340,004 = 360,896 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-53})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{596,953 - 360,896}{\ln \left(\frac{596,953}{360,896} \right)} = 469,066 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-54})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.3.6 *Tepelný výkon VÝP2*

$$Q_{VÝP2}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 38,309 \cdot 68,848 \cdot 469,066 \cdot 10^{-3} = 1237,163 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 8-55})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.4 Výparné trubky po stěnách (VÝP)

8.4.1 Geometrie výparných trubek

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Délka šikmého dna:	$l = 4,219 \text{ m}$
Zadní výška:	$h = 7,321 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 17$

Plocha trubek

$$S = \left(A \cdot h + \frac{A \cdot 3,156}{2} \right) \cdot 2 = \left(2,8 \cdot 7,321 + \frac{2,8 \cdot 3,156}{2} \right) \cdot 2 = 49,834 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-56})$$

8.4.2 Parametry páry a spalín

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	291,004	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	340,004	°C
Teplota spalín	t_s^{IN}	887,957	°C	Teplota spalín	t_s^{OUT}	700,9	°C

Tab. 8-4 Parametry páry a spalín

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{291,004 + 340,004}{2} = 315,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-57})$$

Střední teplota spalín

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{887,957 + 700,9}{2} = 794,428 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 8-58})$$

Světlý průřez spalín

$$F_s = S - n_t \cdot D \cdot 2 = 49,834 - 17 \cdot 0,0603 \cdot 2 = 47,784 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 8-59})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.4.3 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin*

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (l + B)} = \frac{4 \cdot 47,784}{2 \cdot (2,8 + 9,08)} = 8,044 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-60})$$

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 95,448 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 133,277 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,623$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{95,448 \cdot 10^{-3}}{8,044} \cdot \left(\frac{4,953 \cdot 8,044}{133,277 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,623^{0,4} \\ &= 5,423 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-61})$$

8.4.4 *Součinitel přestupu tepla sáláním*

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,44 \cdot (887,957 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{887,957 + 273,15} \right)} = \\ &= 67,337 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 8-62})$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,536 \cdot 0,1 \cdot 3,77} = 0,44 \quad (\text{Rov. 8-63})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 3,77}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{887,957 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 8-64}) \\ &= 1,536 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 8-65})$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \left(\frac{A \cdot B \cdot 3,156}{2 \cdot B \cdot l} \right) = 3,6 \cdot \left(\frac{2,8 \cdot 9,08 \cdot 3,156}{2 \cdot 9,08 \cdot 4,219} \right) = 3,77 \text{ m} \quad (\text{Rov. 8-66})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 315,504 + 25 = 340,504 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-67})$$

8.4.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (5,423 + 67,337) = 68,395 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 8-68})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 887,957 - 291,004 = 596,953 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-69})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 700,9 - 340,004 = 360,896 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-70})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{596,953 - 360,896}{\ln\left(\frac{596,953}{360,896}\right)} = 469,066 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8-71})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

8.4.6 *Tepelný výkon VÝP3*

$$Q_{VÝP3}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 49,834 \cdot 68,395 \cdot 469,066 \cdot 10^{-3} = 1598,77 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 8-72})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9 SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 3

Geometrie spalínového kanálu

Šířka spalínového kanálu:	$A = 0,3 \text{ m}$
Hloubka spalínového kanálu:	$B = 9,08 \text{ m}$
Výška spalínového kanálu:	$C = 7,321 \text{ m}$

9.1 Mříž (VÝP)

Mříž je v tomto případě soustava trubek, která převádí parovodní směs ve výparníku ze zadní, respektive spodní, membránové stěny trubek napříč spalínovým kanálem směrem k bubnu.

9.1.1 Geometrie mříže

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru hloubky:	$s_{t1} = 0,16 \text{ m}$
Délka hadu trubek:	$l = 7 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru šířky:	$s_{t2} = 0,15 \text{ m}$
Počet řad:	$n_{\text{ř}} = 56$
Počet trubek:	$n_t = 3$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_t \cdot n_{\text{ř}} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 56 = 222,779 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 9-1})$$

9.1.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	291,004	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	340,004	°C
Měrný objem páry	v_p^{IN}	0,0013	m^3/kg	Měrný objem páry	v_p^{OUT}	0,0108	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	700,758	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	678,7	°C

Tab. 9-1 Parametry páry a spalin

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{291,004 + 340,004}{2} = 315,504 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-2})$$

Střední měrný objem páry

$$v_p^{STŘ} = \frac{v_p^{IN} + v_p^{OUT}}{2} = \frac{0,0013 + 0,0108}{2} = 0,00607 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 9-3})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{700,758 + 678,7}{2} = 689,729 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-4})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_{\ddot{r}} \cdot n_t \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 3 \cdot 0,0603 = 42,837 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 9-5})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STŘ}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{42,837} \cdot \frac{273,15 + 689,729}{273,15} = 6,002 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 9-6})$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{V\ddot{Y}P} \cdot v_p^{STŘ}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_t \cdot n_{\ddot{r}}} = \frac{4 \cdot 61,688 \cdot 0,00607}{\pi \cdot 0,04792^2 \cdot 3 \cdot 56} = 34,607 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 9-7})$$

9.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 85,848 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 111,699 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,633$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{p\ddot{r}} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 0,796 \cdot 0,331 \cdot \frac{85,848 \cdot 10^{-3}}{0,0603} \cdot \left(\frac{4,953 \cdot 0,0603}{111,699 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,633^{0,33} \quad (\text{Rov. 9-8}) \\ &= 12,315 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

9.1.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné proudění

$$\begin{aligned} \alpha_{kp}^{př} &= 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{52,654 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{34,607 \cdot 0,0479}{4,972 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,935^{0,4} \quad (\text{Rov. 9-9}) \\ &= 40688,711 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Součinitel tepelné vodivosti páry [5]	$\lambda = 52,654 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity páry [5]	$\nu = 4,972 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Součinitel dynamické viskozity páry [5]	$\eta = 8,197 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Prandtlovo číslo páry [5]	$Pr = 0,935$

9.1.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,204 \cdot (700,758 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{700,758 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{340,504 + 273,15}{700,758 + 273,15} \right)} = \quad (\text{Rov. 9-10}) \\ &= 21,16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-5,672 \cdot 0,1 \cdot 0,402} = 0,204 \quad (\text{Rov. 9-11})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}
 k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,402}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{700,758 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 9-12}) \\
 &= 5,672 \frac{1}{m \cdot MPa}
 \end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 9-13})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_{t1} \cdot s_{t2}}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,15}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,402 \text{ m} \quad (\text{Rov. 9-14})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 315,504 + 25 = 340,504 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-15})$$

9.1.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot (\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s)}{\left(1 + \frac{\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s}{\alpha_{kp}^{př}} \right)} = \frac{0,94 \cdot (12,315 + 21,16)}{\left(1 + \frac{12,315 + 21,16}{40688,711} \right)} = 31,44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 9-16})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 700,758 - 291,004 = 409,754 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-17})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 678,7 - 340,004 = 338,696 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-18})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{409,754 - 338,696}{\ln\left(\frac{409,754}{338,696}\right)} = 373,098 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-19})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9.1.7 Tepelný výkon VÝP4

$$Q_{VÝP4}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 222,779 \cdot 31,44 \cdot 373,098 \cdot 10^{-3} = 2613,277 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 9-20})$$

Kontrola výpočtu VÝP

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{Q_{VÝP} - (Q_{tr} + Q_{VÝP1}^{skut} + Q_{VÝP2}^{skut} + Q_{VÝP3}^{skut} + Q_{VÝP4}^{skut})}{Q_{VÝP}} \cdot 100 \\ &= \frac{82173,47 - (59921,037 + 16840,43 + 1237,163 + 1598,77 + 2613,277)}{82173,47} \cdot 100 \quad (\text{Rov. 9-21}) \\ &= -0,048 \% \end{aligned}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9.2 Třetí úsek stropního přehříváku páry (SPP)

9.2.1 Geometrie stropního přehříváku

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky: $D = 0,0603 \text{ m}$

Tloušťka stěny trubky: $t = 0,0062 \text{ m}$

Vnitřní průměr trubky: $d = 0,0479 \text{ m}$

Rozteč trubek: $s_t = 0,16 \text{ m}$

Počet trubek: $n_t = 56$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_t = \pi \cdot 0,0603 \cdot 0,3 \cdot 56 = 3,183 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 9-22})$$

9.2.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	341,5	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	341,6	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	700,758	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	678,7	°C

Tab. 9-2 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{341,5 + 341,6}{2} = 341,55 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-23})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{700,758 + 678,7}{2} = 689,729 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 9-24})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_t \cdot A \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 0,3 \cdot 0,0603 = 65,462 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 9-25})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9.2.3 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin*

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (C + B)} = \frac{4 \cdot 65,462}{2 \cdot (7,321 + 9,08)} = 7,983 \text{ m} \quad (\text{Rov. 9-26})$$

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 85,548 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 111,699 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,633$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{85,548 \cdot 10^{-3}}{7,983} \cdot \left(\frac{6,002 \cdot 7,983}{111,699 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,633^{0,4} \\ &= 6,581 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 9-27})$$

9.2.4 *Součinitel přestupu tepla sáláním*

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,123 \cdot (700,758 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{366,55 + 273,15}{700,758 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{366,55 + 273,15}{700,758 + 273,15} \right)} = \\ &= 19,809 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 9-28})$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-10,155 \cdot 0,1 \cdot 0,129} = 0,123 \quad (\text{Rov. 9-29})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned} k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,129}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{700,758 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 9-30}) \\ &= 10,155 \frac{1}{m \cdot MPa} \end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 9-31})$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_t \cdot s_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0603}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,129 \text{ m} \quad (\text{Rov. 9-32})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 341,55 + 25 = 366,55 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-33})$$

9.2.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (6,581 + 19,809) = 18,621 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 9-34})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 700,758 - 341,5 = 359,258 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-35})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 678,7 - 341,6 = 337,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-36})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{359,258 - 337,1}{\ln\left(\frac{359,258}{337,1}\right)} = 348,062 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9-37})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

9.2.6 *Tepelný výkon SPP3*

$$Q_{SPP3}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 3,183 \cdot 18,621 \cdot 348,062 \cdot 10^{-3} = 20,627 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 9-38})$$

10 SPALINOVÝ KANÁL - ČÁST 4

Geometrie spalínového kanálu

Šířka spalínového kanálu: $A = 4,75 \text{ m}$

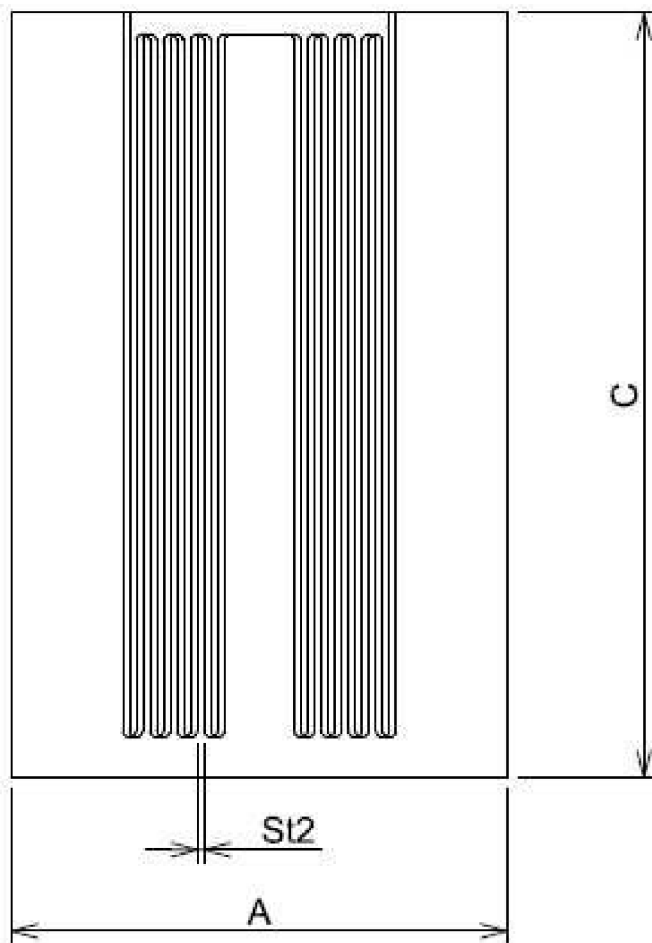
Hloubka spalínového kanálu: $B = 9,08 \text{ m}$

Výška spalínového kanálu: $C = 7,321 \text{ m}$

10.1 Přehřívák páry (PP1)

Trubky přehříváku jsou tažené dvojitě po šířce kanálu v protiproudém zapojení. Tito dvoj-hadi jsou uspořádáni za sebou v dané rozteči.

10.1.1 Geometrie přehříváku



Obr. 10-1 Geometrie přehříváku PP1

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0318 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,00563 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,02054 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru hloubky:	$s_{t1} = 0,16 \text{ m}$
Délka hadu trubek:	$l = 6,74 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru šířky:	$s_{t2} = 0,13 \text{ m}$
Počet řad:	$n_{\dot{r}} = 56$
Počet trubek:	$n_t = 32$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_t \cdot n_{\dot{r}} = \pi \cdot 0,0318 \cdot 6,74 \cdot 32 \cdot 56 = 1206,632 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-1})$$

10.1.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	344,338	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	392,236	°C
Měrný objem páry	v_p^{IN}	0,0116	m^3/kg	Měrný objem páry	v_p^{OUT}	0,0159	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	678,534	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	522	°C

Tab. 10-1 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{344,338 + 392,236}{2} = 368,287 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-2})$$

Střední měrný objem páry

$$v_p^{STŘ} = \frac{v_p^{IN} + v_p^{OUT}}{2} = \frac{0,0116 + 0,0159}{2} = 0,01378 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 10-3})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{678,534 + 522}{2} = 600,267 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-4})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_{\ddot{r}} \cdot l \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 6,74 \cdot 0,0318 = 54,472 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-5})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{ST\ddot{R}}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{54,472} \cdot \frac{273,15 + 600,267}{273,15} = 4,282 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 10-6})$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp1} \cdot v_p^{ST\ddot{R}}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_t \cdot n_{\ddot{r}}} = \frac{4 \cdot 61,688 \cdot 0,01378}{\pi \cdot 0,02054^2 \cdot 32 \cdot 56} = 22,904 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 10-7})$$

10.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Součinitel tepené vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 77,377 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 95,034 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,642$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{p\ddot{r}} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot \frac{77,377 \cdot 10^{-3}}{0,0318} \cdot \left(\frac{4,282 \cdot 0,0318}{95,034 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,642^{0,33} \\ &= 38,359 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-8})$$

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

10.1.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné proudění

$$\begin{aligned} \alpha_{kp}^{p\ddot{r}} &= 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{86,155 \cdot 10^{-3}}{0,02054} \cdot \left(\frac{22,904 \cdot 0,02054}{3,234 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,478^{0,4} \\ &= 9605,408 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-9})$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel tepelné vodivosti páry [5]	$\lambda = 86,155 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity páry [5]	$\nu = 3,234 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Součinitel dynamické viskozity páry [5]	$\eta = 2,347 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Prandtlovo číslo páry [5]	$Pr = 1,478$

10.1.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,263 \cdot (678,534 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{393,287 + 273,15}{678,534 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{393,287 + 273,15}{678,534 + 273,15}\right)} \quad (\text{Rov. 10-10})$$

$$=$$

$$= 28,079 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$a_{st} = 0,8$ (voleno) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-4,24 \cdot 0,1 \cdot 0,721} = 0,263 \quad (\text{Rov. 10-11})$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,721}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{678,534 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 10-12})$$

$$= 4,24 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 10-13})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_{t1} \cdot s_{t2}}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,13}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,721 \text{ m} \quad (\text{Rov. 10-14})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STŘ} + \Delta t = 368,287 + 25 = 393,287 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-15})$$

10.1.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot (\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s)}{\left(1 + \frac{\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s}{\alpha_{kp}^{př}} \right)} = \frac{0,94 \cdot (38,359 + 28,079)}{\left(1 + \frac{38,359 + 28,079}{9605,408} \right)} = 63,993 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 10-16})$$

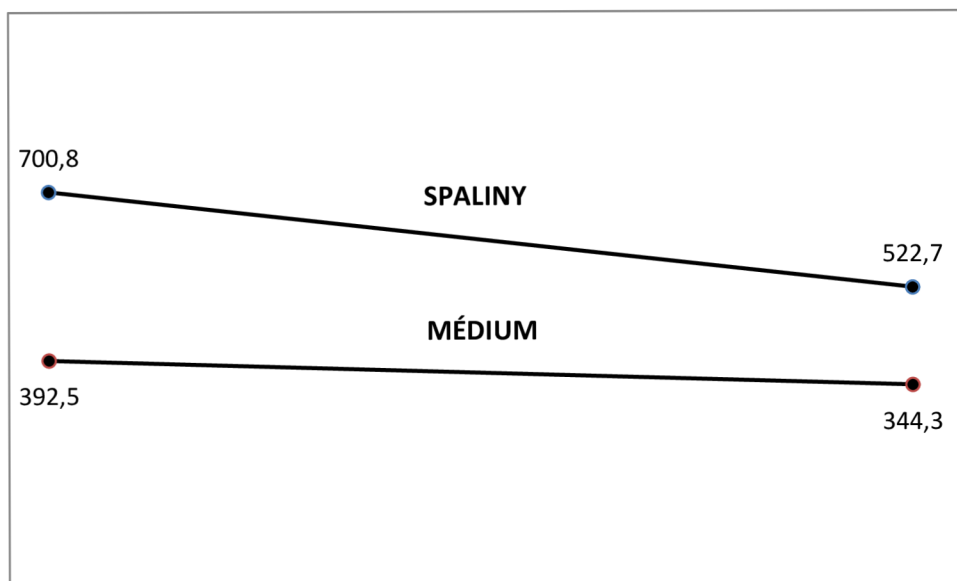
$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{OUT} = 678,534 - 392,236 = 286,298 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-17})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{IN} = 522 - 344,338 = 177,663 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-18})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{286,298 - 177,663}{\ln \left(\frac{286,298}{177,663} \right)} = 227,677 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-19})$$



Obr. 10-2 Schéma teplotního spádu PP1

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.1.7 Tepelný výkon PP1

$$Q_{PP1}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 1206,632 \cdot 63,993 \cdot 227,677 \cdot 10^{-3} \\ = 17580,38 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 10-20})$$

Kontrola výpočtu PP1

$$\Delta Q = \frac{Q_{PP1} - Q_{PP1}^{skut}}{Q_{PP1}} \cdot 100 = \frac{17580,997 - 17580,38}{17580,997} \cdot 100 = 0,004 \% \quad (\text{Rov. 10-21})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.2 Čtvrtý úsek stropního přehříváku páry (SPP)

10.2.1 Geometrie stropního přehříváku

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek:	$s_t = 0,16 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 56$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_t = \pi \cdot 0,0603 \cdot 4,75 \cdot 56 = 50,39 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-22})$$

10.2.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	341,6	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	342	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	678,534	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	522	°C

Tab. 10-2 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{341,6 + 342}{2} = 341,8 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-23})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{678,534 + 522}{2} = 600,267 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-24})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_t \cdot A \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 4,75 \cdot 0,0603 = 50,435 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-25})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.2.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (C + B)} = \frac{4 \cdot 50,435}{2 \cdot (7,321 + 9,08)} = 6,15 \text{ m} \quad (\text{Rov. 10-26})$$

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 77,377 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 95,034 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,642$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{77,377 \cdot 10^{-3}}{6,15} \cdot \left(\frac{4,282 \cdot 6,15}{95,034 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,642^{0,4} \\ &= 5,477 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-27})$$

10.2.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,124 \cdot (678,534 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{366,8 + 273,15}{678,534 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{366,8 + 273,15}{678,534 + 273,15} \right)} \\ &= 12,761 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-28})$$

$a_{st} = 0,8$ (voleno) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-10,285 \cdot 0,1 \cdot 0,129} = 0,124 \quad (\text{Rov. 10-29})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,129}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{678,534 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 10-30}) \\ &= 10,285 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 10-31})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_t \cdot s_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0603}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,129 \text{ m} \quad (\text{Rov. 10-32})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STŘ} + \Delta t = 341,8 + 25 = 366,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-33})$$

10.2.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (5,477 + 12,761) = 17,144 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 10-34})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 678,534 - 341,6 = 336,934 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-35})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 522 - 342 = 180 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-36})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{336,934 - 180}{\ln\left(\frac{336,934}{180}\right)} = 250,321 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-37})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.2.6 Tepelný výkon SPP4

$$Q_{SPP4}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 50,39 \cdot 17,144 \cdot 250,321 \cdot 10^{-3} = 216,247 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 10-38})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.3 Šestý úsek stropního přehříváku páry (SPP)

10.3.1 Geometrie stropního přehříváku

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek:	$s_t = 0,16 \text{ m}$
Počet trubek:	$n_t = 58$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot C \cdot n_t = \pi \cdot 0,0603 \cdot 7,321 \cdot 58 = 80,439 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-39})$$

10.3.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	343,3	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	344,338	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	678,534	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	522	°C

Tab. 10-3 Parametry páry a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{343,3 + 344,338}{2} = 343,819 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-40})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{678,534 + 522}{2} = 600,267 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 10-41})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_t \cdot A \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 4,75 \cdot 0,0603 = 50,435 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 10-42})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.3.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 50,435}{2 \cdot (4,75 + 9,08)} = 7,294 \text{ m} \quad (\text{Rov. 10-43})$$

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 77,377 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 95,034 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,642$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - podélné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{pod} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot \frac{77,377 \cdot 10^{-3}}{7,294} \cdot \left(\frac{4,282 \cdot 7,294}{95,034 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,642^{0,4} \\ &= 5,294 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-44})$$

10.3.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,124 \cdot (678,534 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{368,819 + 273,15}{678,534 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{368,819 + 273,15}{678,534 + 273,15} \right)} \\ &= 12,798 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 10-45})$$

$a_{st} = 0,8$ (voleno) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-10,285 \cdot 0,1 \cdot 0,129} = 0,124 \quad (\text{Rov. 10-46})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,129}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{678,534 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 10-47}) \\ &= 10,285 \frac{1}{m \cdot MPa}\end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 10-48})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_t \cdot s_d}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0603}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,129 \text{ m} \quad (\text{Rov. 10-49})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 343,819 + 25 = 368,819 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-50})$$

10.3.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot (\alpha_{ks}^{pod} + \alpha_s) = 0,94 \cdot (5,294 + 12,798) = 17,006 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 10-51})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 678,534 - 343,3 = 335,234 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-52})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 522 - 344,338 = 177,663 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-53})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{335,234 - 177,663}{\ln\left(\frac{335,234}{177,663}\right)} = 248,166 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10-54})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

10.3.6 Tepelný výkon SPP6

$$Q_{SPP6}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 80,439 \cdot 17,006 \cdot 248,166 \cdot 10^{-3} = 339,474 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 10-55})$$

11 SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 5

Geometrie spalinového kanálu

Šířka spalinového kanálu:	$A = 0,3 \text{ m}$
Hloubka spalinového kanálu:	$B = 9,08 \text{ m}$
Výška spalinového kanálu:	$C = 7,321 \text{ m}$

11.1 Mříž - pátý úsek stropního přehříváku páry (SPP)

Mříž je v tomto případě soustava trubek, která převádí páru ze stropního přehříváku do spodní komory, napříč spalinovým kanálem.

11.1.1 Geometrie mříže

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky:	$D = 0,0603 \text{ m}$
Tloušťka stěny trubky:	$t = 0,0062 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubky:	$d = 0,0479 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru hloubky:	$s_{t1} = 0,16 \text{ m}$
Délka hadu trubek:	$l = 7,321 \text{ m}$
Rozteč trubek ve směru šířky:	$s_{t2} = 0,1 \text{ m}$
Počet řad:	$n_{\check{r}} = 56$
Počet trubek:	$n_t = 4$

Plocha trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_t \cdot n_{\check{r}} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 7,321 \cdot 4 \cdot 56 = 310,66 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 11-1})$$

11.1.2 Parametry páry a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota páry	t_p^{IN}	342	°C	Teplota páry	t_p^{OUT}	343,3	°C
Měrný objem páry	v_p^{IN}	0,0111	m^3/kg	Měrný objem páry	v_p^{OUT}	0,0116	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	522,723	°C	Teplota	t_s^{OUT}	512	°C

Tab. 11-1 Parametry páry a spalin

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota páry

$$t_p^{STŘ} = \frac{t_p^{IN} + t_p^{OUT}}{2} = \frac{342 + 343,3}{2} = 342,65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-2})$$

Střední měrný objem páry

$$v_p^{STŘ} = \frac{v_p^{IN} + v_p^{OUT}}{2} = \frac{0,0111 + 0,0116}{2} = 0,01137 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 11-3})$$

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{522,723 + 512}{2} = 517,362 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-4})$$

Světlý průřez spalin

$$F_s = B \cdot C - n_{\ddot{r}} \cdot n_t \cdot D = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 4 \cdot 0,0603 = 41,753 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 11-5})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STŘ}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{41,753} \cdot \frac{273,15 + 517,362}{273,15} = 5,056 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 11-6})$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{SPP} \cdot v_p^{STŘ}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_t \cdot n_{\ddot{r}}} = \frac{4 \cdot 61,688 \cdot 0,01137}{\pi \cdot 0,0479^2 \cdot 4 \cdot 56} = 16,221 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 11-7})$$

11.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Součinitel teplené vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 69,643 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 80,083 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,65$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{př} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 0,844 \cdot 0,308 \cdot \frac{69,643 \cdot 10^{-3}}{0,0603} \cdot \left(\frac{5,056 \cdot 0,0603}{80,083 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,65^{0,33} \quad (\text{Rov. 11-8}) \\ &= 11,061 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

11.1.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí u páry

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné proudění

$$\begin{aligned} \alpha_{kp}^{př} &= 0,023 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{106,574 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{16,221 \cdot 0,0479}{2,567 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,174^{0,4} \quad (\text{Rov. 11-9}) \\ &= 10682,202 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Součinitel tepelné vodivosti páry [5]	$\lambda = 106,574 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity páry [5]	$\nu = 2,567 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Součinitel dynamické viskozity páry [5]	$\eta = 2,258 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Prandtlovo číslo páry [5]	$Pr = 2,174$

11.1.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,181 \cdot (522,723 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{367,65 + 273,15}{522,723 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{367,65 + 273,15}{522,723 + 273,15} \right)} \quad (\text{Rov. 11-10}) \\ &= \\ &= 13,011 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$a_{st} = 0,8$ (*voleno*) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-7,992 \cdot 0,1 \cdot 0,25} = 0,181 \quad (\text{Rov. 11-11})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}
 k &= k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s^{IN} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,25}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{522,723 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 11-12}) \\
 &= 7,992 \frac{1}{m \cdot MPa}
 \end{aligned}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 11-13})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_{t1} \cdot s_{t2}}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,1}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,25 \text{ m} \quad (\text{Rov. 11-14})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_p^{STR} + \Delta t = 342,65 + 25 = 367,65 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-15})$$

11.1.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot (\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s)}{\left(1 + \frac{\alpha_{ks}^{př} + \alpha_s}{\alpha_{kp}^{př}} \right)} = \frac{0,94 \cdot (11,061 + 13,011)}{\left(1 + \frac{11,061 + 13,011}{10682,202} \right)} = 22,577 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Rov. 11-16})$$

$\psi = 0,94$ (voleno) - součinitel tepelné efektivity

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_p^{IN} = 522,723 - 342 = 180,723 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-17})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_p^{OUT} = 512 - 343,3 = 168,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-18})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{180,723 - 168,7}{\ln \left(\frac{180,723}{168,7} \right)} = 174,643 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11-19})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

11.1.7 Tepelný výkon SPP5

$$Q_{SPP5}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 310,66 \cdot 22,577 \cdot 174,643 \cdot 10^{-3} = 1224,894 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 11-20})$$

Kontrola výpočtu SPP

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{Q_{SPP} - (Q_{SPP1}^{skut} + Q_{SPP2}^{skut} + Q_{SPP3}^{skut} + Q_{SPP4}^{skut} + Q_{SPP5}^{skut} + Q_{SPP6}^{skut})}{Q_{SPP}} \cdot 100 \\ &= \frac{3335,994 - (1183,576 + 301,332 + 20,627 + 216,247 + 1224,894 + 339,474)}{3335,994} \cdot 100 = 1,494 \% \end{aligned} \quad (\text{Rov. 11-21})$$

12 SPALINOVÝ KANÁL - ČÁST 6

Geometrie spalínového kanálu

Šířka spalínového kanálu: $A = 6 \text{ m}$

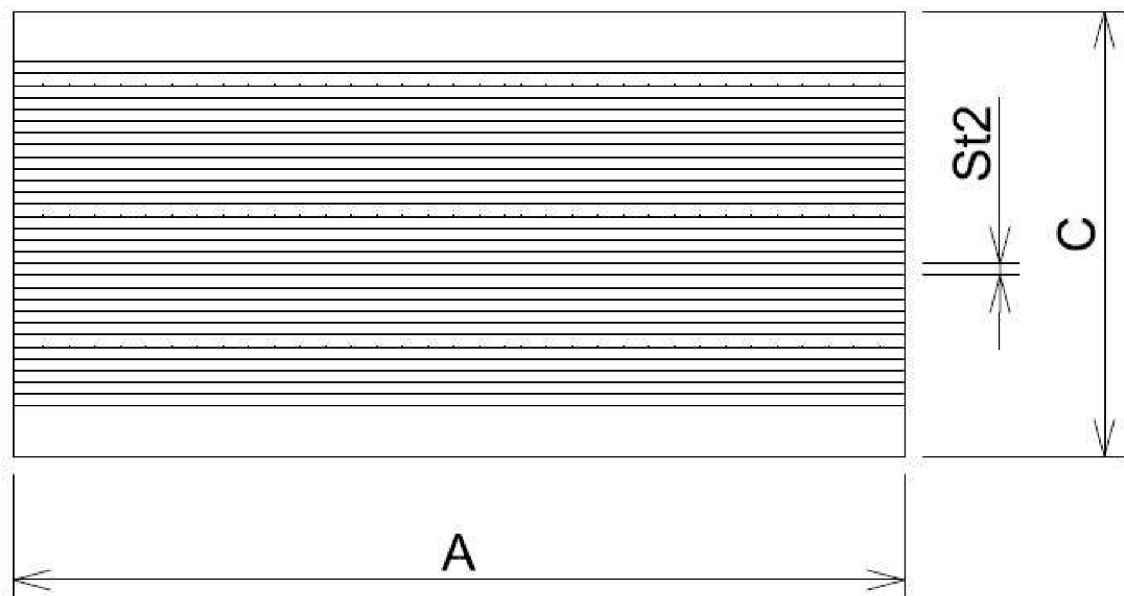
Hloubka spalínového kanálu: $B = 9,08 \text{ m}$

Výška spalínového kanálu: $C = 3 \text{ m}$

12.1 Ekonomizér (EKO)

Ekonomizér se skládá z uspořádané soustavy žebrovaných trubek v protiproudém zapojení. V trubkách proudí napájecí voda, která se přebírá od spalin tepelnou energii.

12.1.1 Geometrie ekonomizéru



Obr. 12-1 Geometrie ekonomizéru EKO

Geometrie trubek

Vnější průměr trubky: $D = 0,0381 \text{ m}$

TLoušťka stěny trubky: $t = 0,00426 \text{ m}$

Vnitřní průměr trubky: $d = 0,02958 \text{ m}$

Rozteč trubek ve směru hloubky: $s_{t1} = 0,1 \text{ m}$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Rozteč trubek ve směru výšky: $s_{t2} = 0,08 \text{ m}$

Počet řad: $n_{\check{r}} = 88$

Počet trubek: $n_t = 28$

Geometrie žeber:

Výška žebra: $h = 0,01 \text{ m}$

Tloušťka žebra: $t_{\check{z}} = 0,001 \text{ m}$

Počet žeber: $x = 110 \text{ ks/m}$

Průměr žebra: $D_{\check{z}} = 0,0581 \text{ m}$

Plocha trubek

$$S = \left(\pi \cdot D \cdot A + \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\check{z}}^2 - D^2) \cdot 2 \cdot x \cdot A + \pi \cdot t_{\check{z}} \cdot x \cdot A \cdot (D_{\check{z}} - D) \right) \cdot n_{\check{r}} \cdot n_t$$

$$= \left(\pi \cdot 0,0381 \cdot 6 + \frac{\pi}{4} \cdot (0,0581^2 - 0,0381^2) \cdot 2 \cdot 110 \cdot 6 + \pi \cdot 0,001 \cdot 110 \cdot 6 \cdot (0,0581 - 0,0381) \right) \cdot 88 \cdot 28 = 6786,588 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 12-1})$$

12.1.2 Parametry vody a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota vody	t_v^{IN}	230	°C	Teplota vody	t_v^{OUT}	291,004	°C
Měrný objem vody	v_v^{IN}	0,0012	m^3/kg	Měrný objem vody	v_v^{OUT}	0,0013	m^3/kg
Teplota spalin	t_s^{IN}	512,009	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	348,9	°C

Tab. 12-1 Parametry vody a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota vody

$$t_v^{STR} = \frac{t_v^{IN} + t_v^{OUT}}{2} = \frac{230 + 291,004}{2} = 260,502 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 12-2})$$

Střední měrný objem vody

$$v_v^{STR} = \frac{v_v^{IN} + v_v^{OUT}}{2} = \frac{0,0012 + 0,0013}{2} = 0,00125 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (\text{Rov. 12-3})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{512,009 + 348,9}{2} = 430,454 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12-4})$$

Světlý průřez spalin

$$\begin{aligned} F_s &= B \cdot C - (n_{\dot{\gamma}} \cdot D \cdot A + t_z \cdot h \cdot x \cdot n_t \cdot A \cdot 2) \\ &= 9,08 \cdot 7,321 - (88 \cdot 0,0381 \cdot 6 + 0,001 \cdot 0,01 \cdot 110 \cdot 28 \cdot 6 \cdot 2) \\ &= 45,988 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (\text{Rov. 12-5})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STŘ}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{45,988} \cdot \frac{273,15 + 430,454}{273,15} = 4,086 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 12-6})$$

Rychlost proudění vody

$$w_v = \frac{4 \cdot M_{EKO} \cdot v_v^{STŘ}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\dot{\gamma}}} = \frac{4 \cdot 61,688 \cdot 0,00125}{\pi \cdot 0,02958^2 \cdot 88} = 1,295 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 12-7})$$

12.1.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin

Součinitel teplené vodivosti pro střední teplotu [2] $\lambda = 61,747 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2] $\nu = 65,659 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2] $Pr = 0,659$

Součinitel přestupu tepla konvekcí - příčné obtékání

$$\begin{aligned} \alpha_{ks}^{př} &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 0,343 \cdot \frac{61,747 \cdot 10^{-3}}{0,0381} \cdot \left(\frac{4,086 \cdot 0,0381}{65,659 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,659^{0,33} \\ &= 7,951 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (\text{Rov. 12-8})$$

C_z, C_s - korekční součinitele [2]

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

12.1.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s^{IN} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s^{IN} + 273,15}\right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,167 \cdot (512,009 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{285,502 + 273,15}{512,009 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{285,502 + 273,15}{512,009 + 273,15}\right)} \quad (\text{Rov. 12-9})$$

$$= 10,161 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$a_{st} = 0,8$ (voleno) - stupeň černosti povrchu stěn

Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-8,864 \cdot 0,1 \cdot 0,206} = 0,167 \quad (\text{Rov. 12-10})$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,206}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{512,009 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3 \quad (\text{Rov. 12-11})$$

$$= 8,864 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{MPa}}$$

r_{H_2O}, r_{sp} - objemové části tříatomových plynů (z Tab. 2-3)

Celkový parciální tlak

$$p_{sp} = r_{sp} \cdot p = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 12-12})$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_{t1} \cdot s_{t2}}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,0381 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,1}{0,0381^2} - 1\right) = 0,206 \text{ m} \quad (\text{Rov. 12-13})$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_v^{STŘ} + \Delta t = 260,502 + 25 = 285,502 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12-14})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

12.1.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\omega \cdot \alpha_{ks}^{př} + \alpha_s}{1 + (\omega \cdot \alpha_{ks}^{př} + \alpha_s) \cdot \varepsilon} = \frac{1 \cdot 7,951 + 10,161}{1 + (1 \cdot 7,951 + 10,161) \cdot 0,006} \quad (\text{Rov. 12-15})$$
$$= 16,337 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$\omega = 1$ (voleno) - součinitel omývání plochy

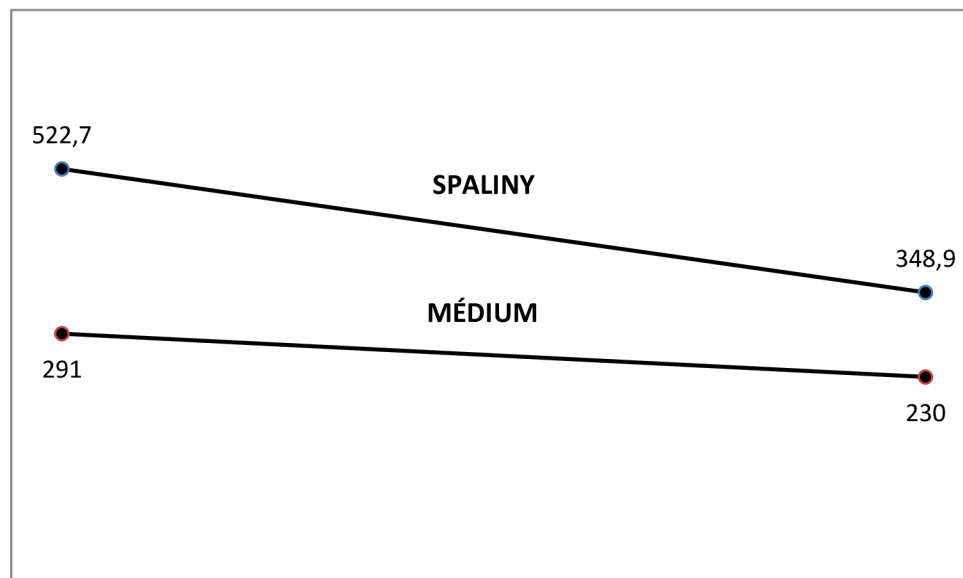
$\varepsilon = 0,006$ (voleno) - součinitel zanesení

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_v^{OUT} = 512,009 - 291,004 = 221,005 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12-16})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_v^{IN} = 348,9 - 230 = 118,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12-17})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{221,005 - 118,9}{\ln\left(\frac{221,005}{118,9}\right)} = 164,711 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12-18})$$



Obr. 12-2 Schéma teplotního spádu EKO

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

12.1.6 Tepelný výkon EKO

$$Q_{EKO}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 6786,588 \cdot 16,337 \cdot 164,711 \cdot 10^{-3} \\ = 18261,99 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 12-19})$$

Kontrola výpočtu EKO

$$\Delta Q = \frac{Q_{EKO} - Q_{EKO}^{skut}}{Q_{EKO}} \cdot 100 = \frac{18321,148 - 18261,99}{18321,148} \cdot 100 = 0,323 \% \quad (\text{Rov. 12-20})$$

13 SPALINOVÝ KANÁL – ČÁST 7

13.1 Ohřívák vzduchu (OVZ)

Spalovací vzduch je předehříván v regeneračním ohříváku vzduchu typu Ljungström. Jeho výhodou je dosažení nejvyšší účinnosti kotle pro paliva s obsahem síry. K ochraně před nízkoteplotní korozí je vzduch před vstupem do ohříváku předehřát v kaloriferu na teplotu 60 °C.

13.1.1 Geometrie Ljungströmu

Pro výpočet použité rozměry z [3].

Průměr rotoru:	$D = 7,65 \text{ m}$
Otáčky rotoru:	$n = 1,24 \text{ ot/min}$
Výška rotoru:	$H = 2,65 \text{ m}$
Úhel sektoru spalin:	$\omega = 227,5^\circ$
Úhel sektoru vzduchu:	$\varepsilon = 137,5^\circ$
Výhřevná plocha dané výšky:	$S = 35524,526 \text{ m}^2$
Ekvivalentní průměr kanálu:	$d_e = 0,0095 \text{ m}$

13.1.2 Parametry vzduchu a spalin

VSTUPNÍ PARAMETRY (IN)				VÝSTUPNÍ PARAMETRY (OUT)			
Teplota vzduchu	t_v^{IN}	60	°C	Teplota vzduchu	t_v^{OUT}	330	°C
Teplota spalin	t_s^{IN}	348,923	°C	Teplota spalin	t_s^{OUT}	155,6	°C

Tab. 13-1 Parametry vzduchu a spalin

Střední hodnoty parametrů

Střední teplota vzduchu

$$t_v^{STŘ} = \frac{t_v^{IN} + t_v^{OUT}}{2} = \frac{60 + 330}{2} = 195 \text{ °C} \quad (\text{Rov. 13-1})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Střední teplota spalin

$$t_s^{STŘ} = \frac{t_s^{IN} + t_s^{OUT}}{2} = \frac{348,923 + 155,6}{2} = 252,262 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 13-2})$$

Teplota stěny listů

$$t_L = \frac{\frac{\omega}{360} \cdot t_s^{STŘ} + \frac{\varepsilon}{360} \cdot t_v^{STŘ}}{\frac{\omega}{360} + \frac{\varepsilon}{360}} = \frac{\frac{227,5}{360} \cdot 252,262 + \frac{137,5}{360} \cdot 195}{\frac{227,5}{360} + \frac{137,5}{360}} = 230,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 13-3})$$

Součinitel přebytku vzduchu na straně vzduchu $\beta_v = 1,04$

Množství vzduchu

$$M_v = M_{pv} \cdot O_{VZ \min} \cdot \beta_v = 12,839 \cdot 3,93 \cdot 1,04 = 52,476 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 13-4})$$

Množství spalin

$$M_s = M_{pv} \cdot O_{SP} \cdot \beta = 12,839 \cdot 5,681 \cdot 1,25 = 91,175 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 13-5})$$

Světlý průřez spalin [3]

$$F_s = 2,85 \cdot 6,3 = 17,955 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov. 13-6})$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{SP}}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_s^{STŘ}}{273,15} = \frac{12,839 \cdot 5,681}{17,955} \cdot \frac{273,15 + 252,262}{273,15} = 7,814 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 13-7})$$

Rychlost proudění vzduchu

$$w_v = \frac{M_v \cdot \frac{\omega}{360}}{M_s \cdot \frac{\varepsilon}{360}} \cdot w_s = \frac{52,476 \cdot \frac{227,5}{360}}{91,175 \cdot \frac{137,5}{360}} \cdot 7,814 = 7,441 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Rov. 13-8})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

13.1.3 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u vzduchu*

$$\begin{aligned} \alpha_k^v &= 0,035 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} && \text{(Rov. 13-9)} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 0,845 \cdot \frac{38,94 \cdot 10^{-3}}{0,0095} \cdot \left(\frac{7,441 \cdot 0,0095}{34,21 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,704^{0,4} \\ &= 47,309 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 38,94 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 34,21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,704$

13.1.4 *Součinitel přestupu tepla konvekcí u spalin*

$$\begin{aligned} \alpha_k^s &= 0,035 \cdot C_l \cdot C_t \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} && \text{(Rov. 13-10)} \\ &= 0,023 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{45,556 \cdot 10^{-3}}{0,0095} \cdot \left(\frac{7,814 \cdot 0,0095}{39,499 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,688^{0,4} \\ &= 60,137 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

C_l, C_t - korekční součinitele [2]

Součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu [2]	$\lambda = 45,556 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu [2]	$\nu = 39,499 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo pro střední teplotu [2]	$Pr = 0,688$

13.1.5 *Součinitel prostupu tepla*

$$k = \frac{1}{\frac{1}{360 \cdot \alpha_k^s} + \frac{1}{360 \cdot \alpha_k^v}} = \frac{1}{\frac{1}{227,5} + \frac{1}{137,5}} = 12,247 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad \text{(Rov. 13-11)}$$

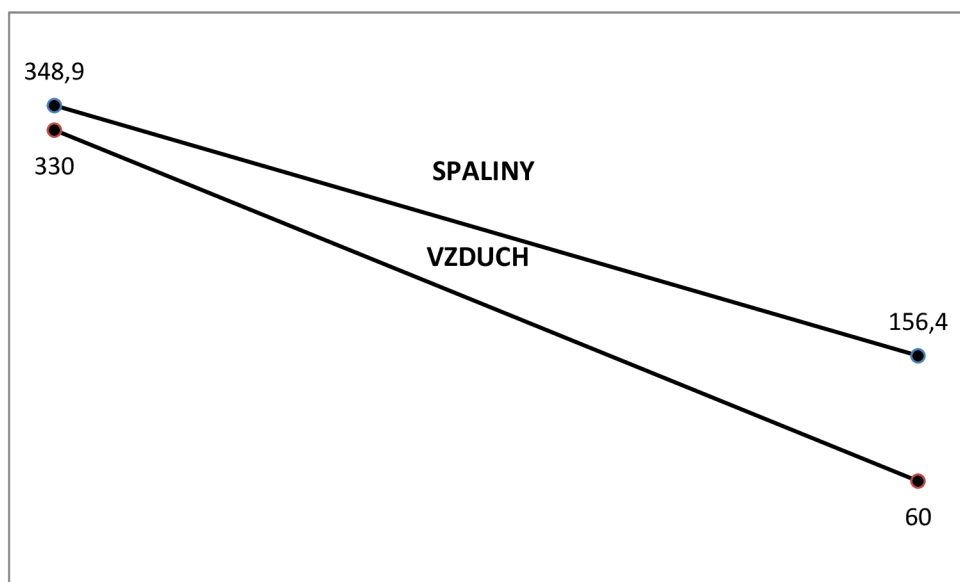
Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_s^{IN} - t_v^{OUT} = 348,923 - 330 = 18,923 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 13-12})$$

$$\Delta t_2 = t_s^{OUT} - t_v^{IN} = 155,6 - 60 = 95,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 13-13})$$

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{18,923 - 95,6}{\ln\left(\frac{18,923}{95,6}\right)} = 47,338 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 13-14})$$



Obr. 13-1 Schéma teplotního spádu OVZ

13.1.6 Tepelný výkon OVZ

$$Q_{OVZ}^{skut} = S \cdot k \cdot \Delta t_{log} \cdot 10^{-3} = 35524,526 \cdot 12,247 \cdot 47,338 \cdot 10^{-3} = 20594,33 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 13-15})$$

Teplo odevzdané spalinami

$$Q_{OVZ}^s = M_{pv} \cdot (I_s^{IN} - I_s^{OUT}) = 12,839 \cdot (2840,04 - 1231,254) = 20517,97 \text{ kW} \quad (\text{Rov. 13-16})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Kontrola výpočtu OVZ

$$\Delta Q = \frac{Q_{OVZ}^s - Q_{OVZ}^{skut}}{Q_{OVZ}^s} \cdot 100 = \frac{20517,97 - 20594,33}{20517,97} \cdot 100 = -0,372\% \quad (\text{Rov. 13-17})$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

14 KONTROLA TEPELNÉ BILANCE

Spalovací komora	Q_{tr}	59921,037	kW
Spalinový kanál – část 1	Q_{PP2}^{skut}	18348,697	kW
	Q_{SPP1}^{skut}	1183,576	kW
	Q_{VYP1}^{skut}	16843,195	kW
Spalinový kanál – část 2	Q_{PP3}^{skut}	19576,37	kW
	Q_{SPP2}^{skut}	301,332	kW
	Q_{VYP2}^{skut}	1237,024	kW
	Q_{VYP3}^{skut}	1598,589	kW
Spalinový kanál – část 3	Q_{VYP4}^{skut}	2613,277	kW
	Q_{SPP3}^{skut}	20,627	kW
Spalinový kanál – část 4	Q_{PP1}^{skut}	17580,378	kW
	Q_{SPP4}^{skut}	216,247	kW
	Q_{SPP6}^{skut}	339,474	kW
Spalinový kanál – část 5	Q_{SPP5}^{skut}	1224,894	kW
Spalinový kanál – část 6	Q_{EKO}^{skut}	18261,988	kW
Celý kotel	ΣQ^{skut}	159266,702	kW

Tab. 14-1 Vypočítané tepelné výkony v jednotlivých částech

Tepelná bilance

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= Q_p^p \cdot M_{pv} \cdot \frac{\eta_K}{100} - \Sigma Q^{skut} \cdot \frac{100 - z_C}{100} \\
 &= 13576,323 \cdot 12,839 \cdot \frac{89,37}{100} - 159266,702 \cdot \frac{100 - 2,354}{100} \quad (\text{Rov. 14-1}) \\
 &= \boxed{265,259 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

Odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p \cdot M_{pv}} \cdot 100 = \frac{265,259}{13576,323 \cdot 12,839} \cdot 100 = \boxed{0,152 \%} \quad (\text{Rov. 14-2})$$

Při kontrole tepelné bilance by neměla být vypočítaná odchylka větší než 0,5 % z tepla přivedeného do kotle. Můj dosažený výsledek tuto podmínku splňuje.

15 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl tepelný návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí a vyčíslení účinnosti při teplotě okolí 25 °C. Kotel má sloužit ke generování vysokotlaké páry o parametrech výstupní přehřáté páry 235 t/h, 14 MPa a 540 °C.

Kotel je z důvodu spalování poměrně nekvalitního hnědého uhlí (vysoký podíl vlhkosti $W_t^r = 41,48\%$ a malá výhřevnost $Q_i^r = 13351\text{ kJ/kg}$) navržen jako práškový s granulačním ohništěm. Jako první jsem provedl stechiometrické výpočty pro zjištění potřebných objemů a entalpii spalovacího vzduchu a spalin. Následoval výpočet tepelné bilance kotle pomocí nepřímé metody, tj. zjištěním všech ztrát kotle. Jejich odečtením jsem dosáhl tepelné účinnosti kotle $\eta_K = 89,367\%$. Při této účinnosti dosahuje kotel tepelného výkonu $Q_V = 159,538\text{ MW}$ při potřebném množství paliva $M_{pv} = 12,839\text{ kg/s}$. Následuje návrh spalovací komory a výpočet teploty spalin na konci ohniště, která vychází $\vartheta_o = 1171,687\text{ °C}$. Nyní jsem navrhl jednotlivé konvekční plochy, jejich tlakové ztráty, teploty, entalpie média na vstupu i výstupu a tepelné výkony. Spaliny při průchodu spalinovým kanálem postupně předávají svou tepelnou energii do výparníku skrze membránové stěny, deskového přehříváku páry, dvou trubkových přehříváků páry, stropního přehříváku páry, ekonomizéru a regeneračního ohříváku vzduchu. U těchto ploch jsem následně provedl návrh a jednotlivé výpočty tepelné bilance ze strany spalin. Při tomto výpočtu jsem musel dodržet, z důvodu nízkoteplotní koroze, teplotu spalin na konci kotle minimálně 155 °C. Další podmínkou bylo dosažení odchylky tepelné bilance jednotlivých konvekčních ploch do $\pm 2\%$ a celkové odchylky tepelné bilance kotle mezi výpočtem a přivedeným teplem do $\pm 0,5\%$. Mnou navržený parní kotel dosahuje odchylky tepelné bilance $\Delta = 0,152\%$ a teploty spalin na výstupu z kotle 156,4 °C. Jednotlivé odchylky konvekčních ploch jsou taktéž splněny.

16 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [2] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. ISBN 80-214-0426-4.
- [3] Odborné podklady výrobce.
- [4] BLOGGER. *Strojírenství mechanika – učivo*. Obrázek. [online]. [2014-05-21]. Dostupný z URL: <<http://strojirenstvi-mechanika.blogspot.cz/2010/11/29-parni-generatory.html>>
- [5] HOLMGREN. X Steam: IAPWS IF97 Excel Steam Tables. Version 2.6. 2006.

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

17 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	-	stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin
a_o	-	stupeň černosti ohniště
a_{pl}	-	stupeň černosti plamene
α	-	součinitel přebytku vzduchu
α_k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla konvekcí
α_K	-	součinitel přebytku vzduchu za kotlem
α_s	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla sáláním
A	m	rozměr spalinového kanálu
A^r	%	procento popelovin ve vzorku paliva
B	m	rozměr spalinového kanálu
B_o	-	Boltzmannovo číslo
c	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrné teplo vzduchu
c_{H_2O}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrné teplo vodní páry
c_p	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrné teplo paliva
c_s	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrné teplo suchého vzduchu
C	m	rozměr spalinového kanálu
C_s	%	podíl popela ve škváře
C_S	-	součinitel opravy na uspořádání
$C_{\acute{u}}$	%	podíl popela v úletu
C_Z	-	součinitel opravy na počet podélných řad
$\Delta\alpha_o$	-	změna přebytku vzduchu přísáváním v ohništi
Δt_{log}	$^{\circ}C$	střední logaritmická teplota
d	m	vnitřní průměr trubky
D	m	vnější průměr trubky
d_e	m	ekvivalentní průměr
ε	-	součinitel zanesení výhřevné plochy
f	-	součinitel vlhkosti
F_S	m^2	světlý průřez spalin

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$F_{\dot{U}S}$	m^2	účinná sálavá plocha stěn ohniště
φ	%	relativní vlhkost vzduchu
φ	-	součinitel uchování tepla
\bar{q}	$kW \cdot m^{-2}$	střední tepelné zatížení stěn ohniště
i_{nv}	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie napájecí vody
i_p	$kJ \cdot kg^{-1}$	fyzické teplo paliva
i_{pp}	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie přehřáté páry
I_O	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie spalin na konci ohniště
I_p	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie popílku
I_{SP}	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie spalin
$I_{SP \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství spalin
I_U	$kJ \cdot kg^{-1}$	užitečné teplo uvolněné v ohništi
$I_{VZ \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství vzduchu
$I'_{VZ \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství nasávaného studeného vzduchu
$I''_{VZ \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství horkého vzduchu
ϑ_a	$^{\circ}C$	teoretická teplota plamene
ϑ_o	$^{\circ}C$	teplota na konci ohniště
ξ	-	součinitel zanesení
k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel prostupu tepla
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
M_{pp}	$kg \cdot s^{-1}$	parní výkon kotle
M_p	$kg \cdot s^{-1}$	množství paliva přivedeného do kotle
M_{pv}	$kg \cdot s^{-1}$	množství paliva skutečně spáleného
M_{vs}	$kg \cdot s^{-1}$	množství vstříku
μ	$g \cdot m^{-3}$	koncentrace popílku ve spalinách
n	ks	počet trubek
η_K	%	tepelná účinnost kotle
O_{Ar}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	objem Ar
O_{CO_2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	objem CO ₂

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

$O_{H_2O \min}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	minimální objem vodní páry
O_{N_2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	objem N_2
$O_{O_2 \min}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	minimální objem kyslíku
O_{SO_2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	objem SO_2
O_{SP}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	skutečné množství spalin
$O_{SP \min}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	minimální množství spalin
$\overline{O_{SP \cdot C}}$	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$	střední celkové měrné teplo spalin
$O_{VZ \min}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	minimální množství vzduchu
p	MPa	tlak v ohništi
p''	MPa	absolutní tlak vodní páry
p_c	MPa	celkový absolutní tlak
Pr	-	Prandtlovo číslo
ψ	-	součinitel tepelné efektivity
Q_i^r	$kJ \cdot kg^{-1}$	výhřevnost paliva
Q_p^p	$kJ \cdot kg^{-1}$	teplo přivedené do kotle
Q_{VZ}	$kJ \cdot kg^{-1}$	teplo přivedené do kotle se vzduchem
r_{CO_2}	-	objemové části tříatomových plynů
r_{H_2O}	-	objemová část vodní páry
r_{SP}	-	součet objemových částí
s	m	účinná tloušťka sálové vrstvy
s_t	m	rozteč trubek
S	m^2	povrch
$t_p^{stř}$	$^{\circ}C$	střední teplota páry
$t_s^{stř}$	$^{\circ}C$	střední teplota spalin
$t_{st}^{stř}$	$^{\circ}C$	střední teplota stěny
T_a	K	absolutní teplota nechlazeného plamene
T_o	K	absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště
T_Z	K	absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	součinitel kinematické viskozity

Návrh parního kotle na spalování hnědého uhlí

v	$m^3 \cdot kg^{-1}$	měrný objem
V_{H_2O}	%	podíl objemu vodní páry
V_o	m^3	objem ohniště
V_{sp}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	průtok spalin
w_p	$m \cdot s^{-1}$	rychlost proudění páry
w_s	$m \cdot s^{-1}$	rychlost proudění spalin
w_v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost proudění vzduchu
W^r	%	obsah vody v palivu
x	-	úhlový součinitel
X_s	%	podíl popela ve škváře
$X_ú$	%	podíl popela v úletu
z_{CO}	%	ztráta chemickým nedopalem
z_C	%	ztráta mechanickým nedopalem
z_F	%	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
z_{SO}	%	ztráta sdílením tepla do okolí
z_K	%	ztráta komínová
z_N	%	ztráta nepočitatelná

18 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Výkresová dokumentace