



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KOTEL NA SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ

BOILER FOR BROWN COAL COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Pavlo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Matej Pavlo**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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

Kotel na spalování hnědého uhlí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování uhlí, který bude respektovat obsah síry v palivu. Navrhněte kotel na spalování hnědého uhlí a pro výrobu vysokotlaké přehřáté páry o výkonu 235 t/h; 14 MPa; 540 °C se sníženou teplotou napájecí vody na 210 °C. Bližší specifikace zadání-viz.podklady zadavatele.

Cíle diplomové práce:

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování uhlí, který bude respektovat obsah síry v palivu.

Seznam 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 spalínových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Cieľom tejto diplomovej práce je tepelný výpočet a rozmerový návrh kotla s výkonom 235 t/h, ktorý spaľuje hnedé uhlie. Práca je rozdelená na niekoľko častí. V prvej časti sú vykonané stechiometrické výpočty a výpočty entalpie vzduchu a spalín. Po výpočte tepelnej bilancie kotla a strát kotla je určená tepelná účinnosť kotla. V ďalšej časti nasleduje tepelný výpočet spaľovacej komory. Následne sú navrhnuté jednotlivé výhrevné plochy a práca je zakončená kontrolou celkovej tepelnej bilancie kotla. Výpočet je doplnený o výkresovú dokumentáciu kotla.

Kľúčové slová

parný kotol, granulačné ohnisko, hnedé uhlie, účinnosť kotla, výparník, ekonomizér, prehrievač, ohrievač vzduchu

Abstract

The aim of the master's thesis is thermal calculation and dimensional design of boiler of 235 t/h which burns brown coal. The work is divided into several parts. In the first part, stoichiometric calculation and the calculations enthalpy of flue gases and air are performed. After calculating the heat balance and loss of the boiler, the boiler efficiency is counted. In the next part, thermal calculation of combustion chamber is calculated. Subsequently, design of the individual heating surfaces is proposed. Finally, the overall heat balance of the boiler is inspected. The calculation is supplemented by drawing of the boiler.

Key words

steam boiler, dry bottom furnace, brown coal, boiler efficiency, evaporator, economizer, super heater, air heater

Bibliografická citácia

PAVLO, M. *Kotel na spalování hnědého uhlí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 122 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu *Kotel na spalování hnědého uhlí* vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce doc. Ing. Zdeněk Skála, Csc. a odborného konzultanta Ing. Mirko Hudeček Csc. a v zozname som uviedol všetky literárne a odborné zdroje.

V Brne dňa 18.5. 2016

.....
Bc. Matej Pavlo

Pod'akovanie

Týmto by som chcel pod'akovať vedúcemu práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi Csc. a pánovi Ing. Mirko Hudečkovi Csc. za odborné vedenie, cenné rady pri spracovaní práce, poskytnutie podkladov a ochotu pri konzultáciách. Ďakujem taktiež rodine za podporu počas štúdia.

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 17 |
| 1 Práškové kotly | 18 |
| 1.1 Granulačné ohnisko | 19 |
| 1.2 Výtavné ohnisko | 20 |
| 2 Stechiometrické výpočty | 22 |
| 2.1 Minimálne objemy vzduchu a spalín | 22 |
| 2.2 Skutočné množstvo vzduchu a spalín | 24 |
| 2.3 Entalpia vzduchu a spalín | 24 |
| 3 Tepelná bilancia kotla | 27 |
| 3.1 Redukovaná výhrevnosť | 27 |
| 3.2 Tepelné straty kotla a účinnosť | 28 |
| 3.2.1 Strata mechanickým nedopalom | 28 |
| 3.2.2 Strata chemickým nedopalom | 28 |
| 3.2.3 Strata sálaním a vedením tepla do okolia | 29 |
| 3.2.4 Strata fyzickým teplom tuhých zvyškov | 29 |
| 3.2.5 Strata citeľným teplom spalín (komínová) | 29 |
| 3.2.6 Tepelná účinnosť kotla | 30 |
| 3.3 Výrobné teplo pary a množstvo paliva | 30 |
| 3.3.1 Výrobné teplo pary | 30 |
| 3.3.2 Množstvo paliva | 30 |
| 4 Výpočet spaľovacej komory | 31 |
| 4.1 Aktívny objem ohniska | 32 |
| 4.2 Plochy ohniska | 32 |
| 4.3 Výpočet ohniska z hľadiska prenosu tepla | 33 |
| 4.3.1 Teplota nechladeného plameňa | 33 |
| 4.3.2 Boltzmannovo číslo | 34 |
| 4.3.3 Súčiniteľ M | 34 |
| 4.3.4 Stupeň černosti ohniska | 34 |
| 4.3.5 Teplota spalín na konci ohniska | 36 |
| 4.3.6 Množstvo tepla odovzdaného v ohnisku do stien | 37 |
| 5 Návrh konvekčných plôch | 38 |
| 5.1 Zadané hodnoty | 38 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2 | Tlakové straty konvekčních plôch..... | 38 |
| 5.3 | Hodnoty vstrekov a odluhu | 38 |
| 5.4 | Tepelná bilancia na strane média | 39 |
| 5.4.1 | Prehrievač SH4 | 39 |
| 5.4.2 | Prehrievač SH3 | 39 |
| 5.4.3 | Prehrievač SH2 | 40 |
| 5.4.4 | Prehrievač SH1 | 41 |
| 5.4.5 | Výparník..... | 41 |
| 5.4.6 | Ekonomizér | 41 |
| 5.4.7 | Ohrievač vzduchu | 42 |
| 5.4.8 | Celkový tepelný výkon | 42 |
| 5.5 | Tepelná bilancia na strane spalín..... | 42 |
| 5.6 | Pilový diagram | 44 |
| 6 | Rozvrhnutie výpočtu konvekčních plôch | 45 |
| 7 | Doskový prehrievač SH3 | 46 |
| 7.1 | Návrh geometrie | 46 |
| 7.2 | Parametre pary a spalín | 47 |
| 7.3 | Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín | 49 |
| 7.4 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary | 50 |
| 7.5 | Súčiniteľ prestupu tepla sálaním | 50 |
| 7.6 | Súčiniteľ prostupu tepla | 52 |
| 7.7 | Tepelný výkon doskového prehrievača SH3 | 53 |
| 7.8 | Výpočet paralelných plôch..... | 54 |
| 7.8.1 | Prvý úsek stropného prehrievača SH1 | 54 |
| 7.8.2 | Trubky výparníka na stenách | 57 |
| 8 | Výstupný prehrievač SH4..... | 59 |
| 8.1 | Návrh geometrie | 59 |
| 8.2 | Parametre pary a spalín | 60 |
| 8.3 | Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín | 61 |
| 8.4 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary | 62 |
| 8.5 | Súčiniteľ prestupu tepla sálaním | 62 |
| 8.6 | Súčiniteľ prostupu tepla | 65 |
| 8.7 | Tepelný výkon výstupného prehrievača SH4..... | 65 |
| 8.8 | Výpočet paralelných plôch..... | 66 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.8.1 | Druhý úsek stropného prehrievača SH1 | 66 |
| 8.8.2 | Trubky výparníka na stenách..... | 69 |
| 9 | Mreža výparníka..... | 71 |
| 9.1 | Návrh geometrie | 71 |
| 9.2 | Parametre parovodnej zmesi a spalín..... | 72 |
| 9.3 | Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín..... | 73 |
| 9.4 | Súčiniteľ prestupu tepla sálaním..... | 74 |
| 9.5 | Súčiniteľ prostupu tepla | 76 |
| 9.6 | Tepelný výkon mreže výparníka..... | 77 |
| 9.7 | Výpočet paralelných plôch | 78 |
| 9.7.1 | Tretí úsek stropného prehrievača SH1..... | 78 |
| 10 | Prehrievač SH2..... | 81 |
| 10.1 | Návrh geometrie | 81 |
| 10.2 | Parametre pary a spalín..... | 82 |
| 10.3 | Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín..... | 83 |
| 10.4 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary..... | 84 |
| 10.5 | Súčiniteľ prestupu tepla sálaním..... | 85 |
| 10.6 | Súčiniteľ prostupu tepla | 87 |
| 10.7 | Tepelný výkon prehrievača SH2..... | 88 |
| 10.8 | Výpočet paralelných plôch | 89 |
| 10.8.1 | Štvrtý úsek stropného prehrievača SH1 | 89 |
| 11 | Mreža stropného prehrievača SH1 | 92 |
| 11.1 | Návrh geometrie | 92 |
| 11.2 | Parametre pary a spalín..... | 93 |
| 11.3 | Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín..... | 94 |
| 11.4 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary..... | 95 |
| 11.5 | Súčiniteľ prestupu tepla sálaním..... | 95 |
| 11.6 | Súčiniteľ prostupu tepla | 97 |
| 11.7 | Tepelný výkon mreže prehrievača SH1 | 98 |
| 12 | Ekonomizér..... | 100 |
| 12.1 | Návrh geometrie | 100 |
| 12.2 | Parametre vody a spalín..... | 101 |
| 12.3 | Redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vonkajšej strany..... | 102 |
| 12.4 | Redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vnútornej strany..... | 104 |

| | | |
|------|--|-----|
| 12.5 | Súčiniteľ prostupu tepla | 104 |
| 12.6 | Tepelný výkon ekonomizéra | 105 |
| 13 | Ohrievač vzduchu | 106 |
| 13.1 | Návrh geometrie | 106 |
| 13.2 | Parametre vzduchu a spalín | 106 |
| 13.3 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín | 108 |
| 13.4 | Súčiniteľ prestupu tepla na strane vzduchu | 108 |
| 13.5 | Súčiniteľ prostupu tepla | 109 |
| 13.6 | Tepelný výkon ohrievača vzduchu | 109 |
| 14 | Kontrola tepelnej bilancie | 110 |
| 15 | Záver | 111 |
| 16 | Zoznam použitej literatúry | 112 |
| 17 | Zoznam použitých skratiek a symbolov | 113 |
| 18 | Zoznam tabuliek | 119 |
| 19 | Zoznam obrázkov | 121 |
| 20 | Zoznam príloh | 122 |

Úvod

Cieľom diplomovej práce je tepelný výpočet a rozmerový návrh kotla pre výrobu vysokotlakej pary s výkonom 235 t/h; 14 MPa ; 540 °C, so zníženou teplotou napájacej vody na 210 °C, ktorý bude rešpektovať obsah síry v palive. Kotel spaľuje hnedé uhlie s vysokým obsahom vlhkosti. Toto palivo je menejhodnotné, preto je kotel realizovaný ako práškový s granulačným ohniskom s dvojrakovými tangenciálnymi horákmi. Kotel je riešený ako podtlakový s dodatkovým ťahom, s výhrevnými plochami ohrievača vody a prehrievačmi pary s reguláciou teploty pary pomocou dvoch vstrekov napájacej vody. Návrh kotla je pre lokalitu v Indonézii s vysokými teplotami a vlhkosťou okolia.

Pri výpočte kotla sa ako prvá určuje stechiometria spalín, ktorou sa zistí objem vzduchu potrebný pre spaľovanie jednotkového množstva paliva a objem spalín, ktoré pri spaľovaní vzniknú.

V ďalšej časti výpočtu sa určia tepelné straty kotla, ktoré umožnia definovať celkovú tepelnú účinnosť kotla a následne aj spotrebu paliva pre dosiahnutie požadovaného tepelného výkonu.

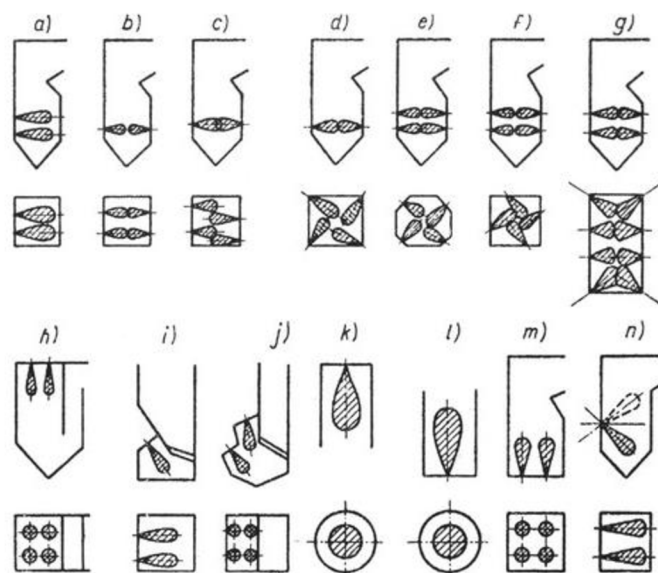
Ďalším krokom je rozvrhnutie výkonov jednotlivých výhrevných plôch. Z tohto návrhu vychádza tepelná bilancia na strane pary, tepelná bilancia na strane spalín a výpočet výhrevných plôch.

1 Práškové kotly

Práškový kotol je zariadenie, ktoré spaľuje v horákoch uhoľný prášok s veľkosťou zrna menšou ako 1 mm. Uhoľný prášok má oproti triedenému uhlíu pre roštové ohnisko radovo 100 až 1000-krát väčší merný povrch a preto jeho spaľovanie prebehne približne aj o toľkokrát rýchlejšie. Doba spaľovania je približne 0,5 – 2 s. V týchto kotloch sa nenachádza rošt, ktorý obmedzuje teplotu primárneho vzduchu a zaťaženie ohniska. Preto je možné ohrievať spaľovací vzduch na podstatne vyššiu teplotu – približne 300 až 450 °C. Tým sa zvýši teplota v ohnisku a umožní sa dokonalejšie spaľovanie aj palív, ktoré sa nedali spaľovať na rošte. Vďaka čomu sú práškové kotly používané na najvyššie výkony. [1, 2]

Uhlie sa na prášok melie v mlecích okruhoch (ventilátorové, tlukadlové, trubnaté a kladkové mlyny), kde dochádza aj k vysušeniu paliva. Rozomletý prášok sa zo zásobníku do ohniska prináša pneumaticky nosným médiom – primárna zmes. Týmto médiom sú spaliny, vzduch alebo ich kombinácia. Primárna zmes vstupuje do kotla práškovými horákmi a v priestore ohniska sa mieša s ďalšou časťou vzduchu – terciálny vzduch. Umiestnenie horákov sa hodnotí z viacerých hľadísk, napr. aké dlhé budú práškovody, stabilizácia zapalovania, rozdelenie tepelných tokov po výške rozdelenia spalín do dodatkových plôch. Avšak najdôležitejšie hľadisko s ohľadom na spaľovanie bude stupeň vyplnenia priečneho prierezu ohniska. Dôležitá je tiež požiadavka, aby sa plameň predčasne nedotýkal stien a tým nedochádzalo k ošľahávaniu trubiek, ktoré tvoria výhrevné plochy, k zatruskovaniu ohniska po zachladnutí tekutej popoloviny na stenách a k nadmerným miestnym tepelným tokom spojených až s poškodením výhrevných plôch. Na obr. 1-1 sú rôzne varianty usporiadania horákov. [1, 2, 3]

K nevýhodám práškových kotlov patrí zvýšenie investičných nákladov na mlecie okruhy a s nimi spojená vyššia vlastná spotreba, ktorá znižuje účinnosť celého zariadenia. Ďalšou nevýhodou je vysoké znečistenie spalín popolčekom, ktoré kladie vyššie nároky na následné odprašovacie zariadenie. [3]



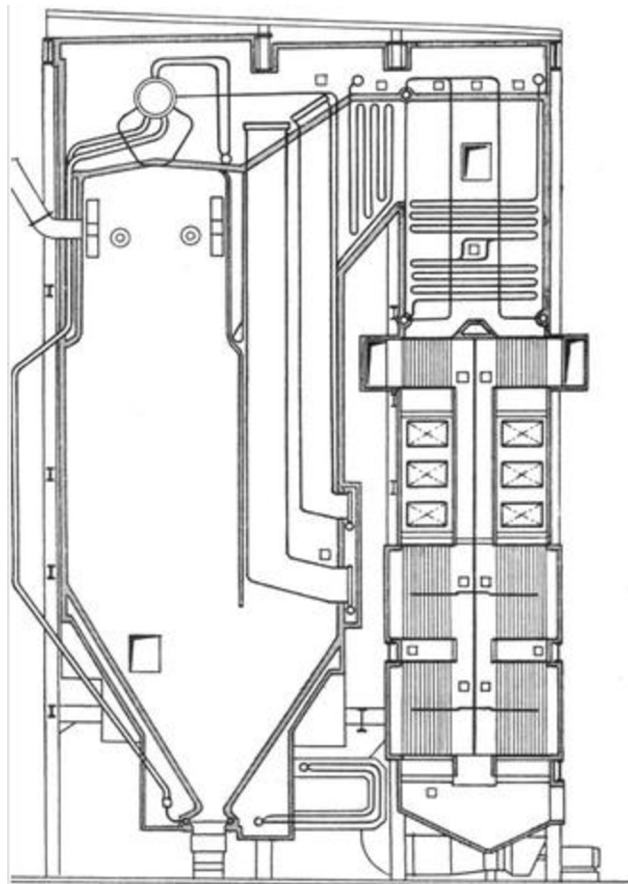
Obr. 1-1 Umiestnenie horákov v ohniskách parných kotlov [3]

a – dvojradové čelné, b – jednoradové protibežné, c – jednoradové vystriedané, d – jednoradové rohové, e – dvojradové tangenciálne (osemuholníkový prierez), f – dvojradové tangenciálne (štvorcový prierez), g – dvojradové kombinované usporiadanie, h – stropné, i – usporiadanie v šikmej stene, j – dvojradové usporiadanie šikmé, stropný olejový horák u valcového ohniska, l – v dne ohniska kruhového prierezu, n – naklápacie horáky

Práškové ohniská sa konštruujú v 2 variantách – granulačné a výtavné. Pri granulačných prebieha spaľovanie prášku za relatívne nižších teplôt v ohnisku, takže väčšina popoloviny neprekročí teplotu tečenia a odchádza z ohniska v tuhej forme ako škvára a popolček. Pri výtavných ohniskách sa popolovina odvádza ako tekutá struska (nad teplotou tečenia). [3]

1.1 Granulačné ohnisko

Granulačné ohniská sú vhodné pre spaľovanie kvalitných palív, ale aj palív menej hodnotných s vysokým podielom vody alebo popola. Ich výhodou je ľahšie udržovanie minimálnych výkonností aj bez stabilizačných horákov, ako u výtavných ohnisk. Tieto ohniská sú menej citlivé na jemnosť mletia a vysušenie paliva, preto stačí jednoduchšia príprava uhoľného prášku. Spaľovanie prebieha pri relatívne nízkych hodnotách, tak aby nedošlo k prekročeniu teplôt tečenia popola, čo vyžaduje intenzívne chladenie spaľovacej komory. Obvykle v jadre plameňa granulačných ohnisk nebývajú teploty vyššie ako 1100 až 1500 °C podľa druhu paliva. Požadovanej teploty v granulačných ohniskách sa dosahuje voľbou paliva, voľbou nižšej teploty spaľovacieho vzduchu (300 až 350 °C) a vychladením stien ohniska najčastejšie výhrevnou plochou výparníka. Častice popola sú počas spaľovania natevené, spájajú sa a tvoria škváru. Škvára padá do spodnej časti ohniska, do výsyvky, prejde vodným uzáverom, ktorý zaistí jej chladenie a spolu s drtičom jej granuláciu a súčasne utesní ohnisko proti vnikaniu falošného vzduchu. Následne je kontinuálne odvádzaná mechanicky alebo hydraulicky. V škváre sa zachytí asi 15 až 25 % popolovín privedených v uhlí. Jemné zrná popolčeka, ktoré tvoria okolo 80 % všetkej popoloviny, sú strhávané spalinami a odchádzajú z ohniska do dodatkových plôch a cez odlučovače do komína. [1, 2, 3]

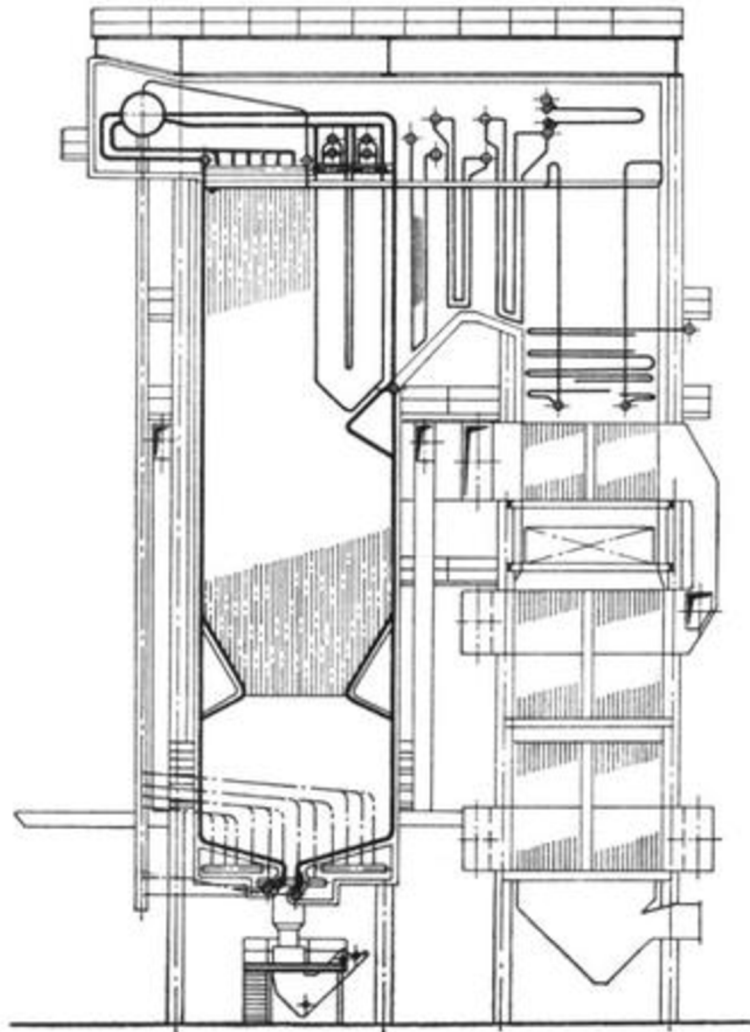


Obr. 1-2 Granulačný kotol s horákmi v hornej časti spaľovacej komory [3]

1.2 Výtavné ohnisko

Podmienkou výtavného procesu je udržať v ohnisku pri všetkých výkonoch v plnom rozsahu vyššiu teplotu, ako je teplota tečenia popolovín, aby sa zvyšky po spálení paliva zhromažďovali na dne výtavného ohniska vo forme tekutej strusky. Vysokých spaľovacích teplôt sa dosahuje voľbou vhodného paliva (vyššia výhrevnosť, nižší obsah vody, nízka teplota tečenia popolovín), vyššou teplotou spaľovacieho vzduchu (350 až 450 °C), zväčšením jemnosti mletia a vysušenia prášku, znížením vychladenia plameňa stenami ohniska v taviacom priestore a dokonalým zmiešavaním paliva a vzduchu (zmiešavacie horáky). Aby sa zaistila tvorba a odvod strusky a na konci ohniska teplota spalín nižšia ako teplota mäknutia popolovín, delí sa ohnisko na 2 priestory – výtavný a ochladzovací. Môžu byť od seba oddelené struskovou mrežou (dvoj priestorové výtavné ohniská) alebo bez struskovej mreže (jednopriestorové výtavné ohniská). Výtavný priestor tvoria steny z otrnených výparníkových trubiek omazaných keramikou hmotou, aby znížili prenos tepla a tým vychladenie a steny ochladzovacieho priestoru sú tvorené najčastejšie membránou bez omazu. Tekutá struska zachytáva na svojom povrchu čiastočky popolčeka a tým sa zvýši stupeň zachytenia popolovín na 40 – 60 %. Dno výtavného priestoru je prakticky vodorovné s malým sklonom trubiek okolo 5 % z dôvodu odvoditeľnosti a nachádza sa v ňom výtakový otvor. Pri spaľovaní palív s vysokou teplotou tečenia sa do paliva pridáva tavidlo (CaO alebo CaCO₃ v pomere 1 : 100), ktoré znižuje teplotu tavenia a tečenia a tým zlepšuje odtok strusky.

Najväčšou prednosťou výtavných ohnísk je vysoký stupeň zachytenia popolovín vo forme granulovanej strusky, ktorá sa ľahko ukladá na skládke. Spaľovanie paliva za vyšších teplôt dovoľuje zvýšiť merné objemové zaťaženie (zmenšenie veľkosti ohniska) a znížiť prebytok vzduchu pri nízkej strate nedopalom. Spaliny z výtavných ohnísk majú nižší rosný bod (približne o 20 °C) ako z granulovaných ohnísk, tým môže byť zvolená nižšia teplota spalín za kotlom a zníži sa komínová strata. Nevýhodou je vyššia vlastná spotreba (jemnejšie mletie paliva, väčšie rýchlosti primárnej zmesi v tryskách horákov), nižší regulačný rozsah, komplikovanejšie mletie okruhy a väčšia citlivosť na kolísanie vlastností palív. Výtavné ohniská môžu spaľovať iba palivá s vysokou výhrevnosťou (nad 18 MJ/kg), s nižším obsahom vody a popolovín a nižšou teplotou tečenia popolovín. [1, 2]



Obr. 1-3 Dvojprostorový výtavný kotel [3]

2 Stechiometrické výpočty

Cieľom stochiometrických výpočtov je zistenie objemu vzduchu potrebného pre spaľovanie 1 kg paliva a objemu spalín, ktoré pri spaľovaní vznikajú. Všetky vzorce sú odvodené za predpokladu dokonalého spaľovania. Ale používajú sa aj pri malom chemickom nedopale, ktorý je daný normou kotlových strát. [4, 5]

2.1 Minimálne objemy vzduchu a spalín

Tab. 2-1 Zloženie paliva

| Výhrevnosť [MJ/kg] | W_t^r [%] | A^r [%] | C^r [%] | H^r [%] | N^r [%] | S^r [%] | O^r [%] |
|-----------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 13,851 | 41,48 | 7,89 | 36,95 | 3,33 | 0,11 | 0,11 | 10,13 |

Minimálny objem kyslíka potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

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

$$O_{O_2 \min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,3695}{12,01} + \frac{0,0333}{4,032} + \frac{0,0011}{32,06} - \frac{0,1013}{32} \right) = 0,804 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Minimálny objem suchého vzduchu pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} \quad (2-2)$$

$$O_{VS \min} = \frac{0,804}{0,21} = 3,827 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Podiel vodnej pary pripadajúcej na 1 Nm³ suchého vzduchu

$\varphi = 80 \%$ - relatívna vlhkosť

$p_c = 0,1 \text{ MPa}$ - celkový tlak

$p'' = 0,0048681 \text{ MPa}$ - parciálny tlak vodnej pary na medzi sýtosti pre teplotu vzduchu 32°C

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad (2-3)$$

$$\chi_v = 1 + \frac{80}{100} \cdot \frac{0,0048681}{0,01 - \frac{80}{100} \cdot 0,0048681} = 1,041$$

Minimálny objem vlhkého vzduchu potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$O_{VV \min} = \chi_v \cdot O_{VS \min} \quad (2-4)$$

$$O_{VV \min} = 1,041 \cdot 3,827 = 3,982 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem vodnej pary v tomto objeme

$$O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}} = O_{\text{VVmin}} - O_{\text{VSmin}} \quad (2-5)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}} = 3,982 - 3,827 = 0,155 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem oxidu uhličitého v spalínách

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^{\text{r}} + 0,0003 \cdot O_{\text{VSmin}} \quad (2-6)$$

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,3695 + 0,0003 \cdot 3,827 = 0,686 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem oxidu siričitého v spalínách

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^{\text{r}} \quad (2-7)$$

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0011 = 0,000751 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem dusíka v spalínách

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^{\text{r}} + 0,7805 \cdot O_{\text{VSmin}} \quad (2-8)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0011 + 0,7805 \cdot 3,827 = 2,988 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem argónu v spalínách

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot O_{\text{VSmin}} \quad (2-9)$$

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot 3,827 = 0,035 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Minimálne množstvo suchých spalín

$$O_{\text{SSmin}} = O_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} + O_{\text{Ar}} \quad (2-10)$$

$$O_{\text{SSmin}} = 0,686 + 0,000751 + 2,988 + 0,035 = 3,71 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Objem vodnej pary v minimálnom objeme vlhkých spalín

$$O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^{\text{r}} + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^{\text{r}} + O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}} \quad (2-11)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0333 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,4148 + 0,155 = 1,041 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Minimálny objem vlhkých spalín pri spálení 1 kg paliva

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2O}^S \quad (2-12)$$

$$O_{SVmin} = 3,71 + 1,041 = 4,751 \frac{Nm^3}{kg}$$

2.2 Skutočné množstvo vzduchu a spalín**Skutočné množstvo vzduchu s prebytkom vzduchu $\alpha = 1,27$**

$$O_{VS} = \alpha \cdot O_{VSmin} \quad (2-13)$$

$$O_{VS} = 1,27 \cdot 3,827 = 4,86 \frac{Nm^3}{kg}$$

Skutočné množstvo spalín z 1 kg paliva pri spaľovaní s prebytkom vzduchu $\alpha = 1,27$

$$O_{SV} = O_{SSmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \quad (2-14)$$

$$O_{SV} = 3,71 + (1,27 - 1) \cdot 3,827 = 4,743 \frac{Nm^3}{kg}$$

2.3 Entalpia vzduchu a spalín

Pri tepelnej bilancii kotlov a spalinových výmenníkov je potrebné vyjadrovať teplo, ktoré je spalinám odoberané. K tomu je vhodnejšie využiť entalpiu spalín ako ich mernú tepelnú kapacitu, ktorá sa so zmenou teploty výrazne mení.

Tab. 2-2 Súčinitele prebytku vzduchu

| | | |
|-------------------------|---------------|------|
| v spaľovacej komore | β | 1,18 |
| za spaľovacou komorou | α_{ok} | 1,27 |
| pred ekonomizérom | α_1 | 1,28 |
| pred ohrievačom vzduchu | α_2 | 1,32 |
| za ohrievačom vzduchu | α_k | 1,38 |

Entalpia minimálneho množstva spalín pre $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{\dot{u}} \cdot A^r \quad (2-15)$$

$$I_{Smin}^t = 0,686 \cdot 170 + 0,000751 \cdot 191,2 + 2,988 \cdot 129,5 + 0,035 \cdot 93,07 + 1,041 \cdot 150,6 + 0,87 \cdot 0,0789 \cdot 80,4 = 666,190 \frac{kJ}{kg}$$

$\alpha_{\dot{u}} = 87 \%$ - pomerný úlet popolčeka z ohniska

Tab. 2-3 Merná entalpia niektorých zložiek spalín v závislosti na teplote [4]

| t [°C] | i_i^t [kJ/Nm ³] | | | | | | popolček [kJ/kg] |
|--------|-------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|--------------|------------------|
| | CO ₂ | SO ₂ | N ₂ | A ^r | H ₂ O | suchý vzduch | |
| 100 | 170 | 191,2 | 129,5 | 93,07 | 150,6 | 132,2 | 80,4 |
| 200 | 357,5 | 394,1 | 259,9 | 186 | 304,5 | 266,2 | 170 |
| 300 | 558,8 | 610,4 | 392,1 | 278,8 | 462,8 | 402,5 | 264,6 |
| 400 | 771,9 | 836,5 | 526,7 | 371,7 | 625,9 | 541,7 | 361,6 |
| 500 | 994,4 | 1070 | 664 | 464,7 | 794,5 | 684,1 | 459,5 |
| 600 | 1225 | 1310 | 804,3 | 557,3 | 968,8 | 829,6 | 558 |
| 700 | 1462 | 1554 | 947,3 | 650,2 | 1149 | 978,1 | 658,3 |
| 800 | 1705 | 1801 | 1093 | 743,1 | 1335 | 1129 | 760,8 |
| 900 | 1952 | 2052 | 1241 | 835,7 | 1526 | 1283 | 868,4 |
| 1000 | 2203 | 2304 | 1392 | 928,2 | 1723 | 1439 | 982,8 |
| 1100 | 2458 | 2540 | 1544 | 1020 | 1925 | 1597 | 1106 |
| 1200 | 2716 | 2803 | 1698 | 1114 | 2132 | 1756 | 1240 |
| 1300 | 2976 | 3063 | 1853 | 1207 | 2344 | 1916 | 1386 |
| 1400 | 3239 | 3323 | 2009 | 1300 | 2559 | 2077 | 1543 |
| 1500 | 3503 | 3587 | 2166 | 1393 | 2779 | 2240 | 1710 |
| 1600 | 3769 | 3838 | 2325 | 1577 | 3002 | 2403 | 2061 |
| 1800 | 4305 | 4363 | 2643 | 1742 | 3458 | 2732 | 2381 |
| 2000 | 4844 | 4890 | 2965 | 1857 | 3925 | 3065 | 2500 |

Entalpia minimálneho množstva vzduchu pri teplote t = 100 °C

$$I_{Vmin}^t = O_{VSmin} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O}^t \quad (2-16)$$

$$I_{Vmin}^t = 3,827 \cdot 132,3 + 0,155 \cdot 150,6 = 529,272 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

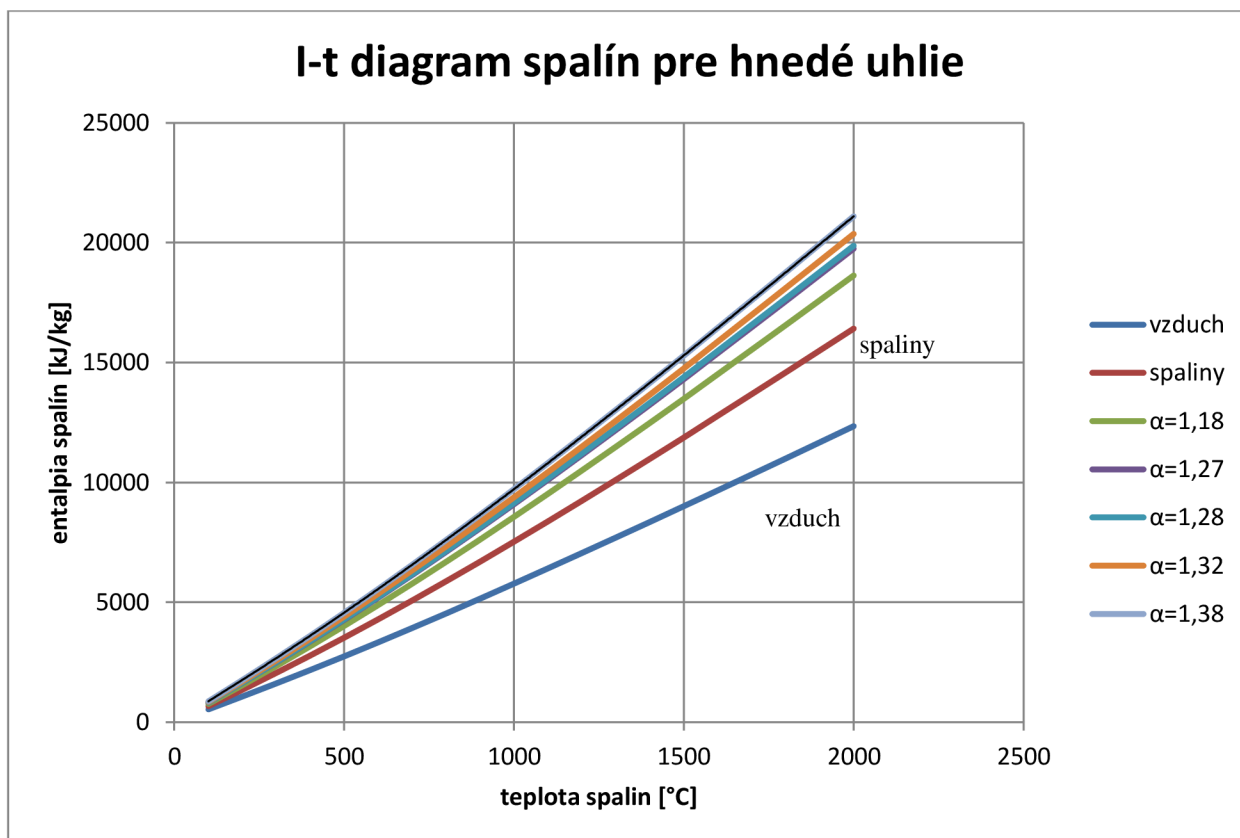
Entalpia spalín pre $\alpha = 1,27$ a t = 100 °C

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad (2-17)$$

$$I_S^{t,\alpha} = 666,190 + (1,27 - 1) \cdot 529,272 = 804,093 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tab. 2-4 Entalpia vzduchu a spalin pre rôzne súčinitele prebytku vzduchu

| t [°C] | I_{Smin}^t [kJ/kg] | I_{Vmin}^t [kJ/kg] | $I_S^{t,\alpha}$ [kJ/kg] | | | | |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | $\alpha = 1,18$ | $\alpha = 1,27$ | $\alpha = 1,28$ | $\alpha = 1,32$ | $\alpha = 1,38$ |
| 100 | 666,1898 | 529,2724 | 761,4589 | 809,093 | 814,3861 | 835,557 | 867,3133 |
| 200 | 1350,7932 | 1065,9449 | 1542,6634 | 1638,598 | 1649,258 | 1691,896 | 1755,852 |
| 300 | 2054,9798 | 1612,1015 | 2345,1581 | 2490,247 | 2506,368 | 2570,852 | 2667,578 |
| 400 | 2779,5133 | 2170,1004 | 3170,1314 | 3365,44 | 3387,141 | 3473,945 | 3604,151 |
| 500 | 3524,3247 | 2741,1982 | 4017,7404 | 4264,448 | 4291,86 | 4401,508 | 4565,98 |
| 600 | 4289,5996 | 3325,0432 | 4888,1074 | 5187,361 | 5220,612 | 5353,613 | 5553,116 |
| 700 | 5073,5427 | 3921,2837 | 5779,3738 | 6132,289 | 6171,502 | 6328,353 | 6563,630 |
| 800 | 5875,7764 | 4527,608 | 6690,7459 | 7098,231 | 7143,507 | 7324,611 | 7596,267 |
| 900 | 6692,9793 | 5146,571 | 7619,3621 | 8082,554 | 8134,019 | 8339,882 | 8648,676 |
| 1000 | 7528,3406 | 5774,118 | 8567,6818 | 9087,352 | 9145,094 | 9376,058 | 9722,505 |
| 1100 | 8374,8702 | 6410,094 | 9528,6872 | 10105,6 | 10169,70 | 10426,10 | 10810,71 |
| 1200 | 9235,0651 | 7050,672 | 10504,1860 | 11138,75 | 11209,25 | 11491,28 | 11914,32 |
| 1300 | 10105,1530 | 7695,852 | 11490,4064 | 12183,03 | 12259,99 | 12567,83 | 13029,58 |
| 1400 | 10983,7449 | 8345,324 | 12485,9032 | 13236,98 | 13320,44 | 13654,25 | 14154,97 |
| 1500 | 11871,5233 | 9003,225 | 13492,1038 | 14302,39 | 14392,43 | 14752,56 | 15292,75 |
| 1600 | 12778,5508 | 9661,591 | 14517,6372 | 15387,18 | 15483,80 | 15870,26 | 16449,96 |
| 1800 | 14587,0401 | 10991,354 | 16565,4838 | 17554,71 | 17664,62 | 18104,27 | 18763,75 |
| 2000 | 16413,1214 | 12338,130 | 18633,9848 | 19744,42 | 19867,80 | 20361,32 | 21101,61 |



3 Tepelná bilancia kotla

Pri zostavovaní tepelnej bilancie sa berie kotol ako energetický stroj, ktorý transformuje chemicky viazanú energiu v palive uvoľňovanú spaľovaním do pracovného média – voda alebo para. Táto transformácia neprebíha dokonale, ale je spojená so vznikom určitých tepelných strát. Úlohou tepelnej bilancie kotla je určenie účinnosti kotla a spotreby paliva pre dosiahnutie požadovaného tepelného výkonu. [4]

3.1 Redukovaná výhrevnosť

Fyzické teplo paliva

Fyzické teplo sa uvažuje v prípadoch, keď je palivo predhrievané mimo kotla. Keď palivo nie je predhrievané cudzím zdrojom, uvažuje sa len keď je obsah vody v palive:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{15000 \cdot 4,19} \quad (3-1)$$

$$0,4148 \geq \frac{13851}{15000 \cdot 4,19}$$

0,4148 ≥ 0,2204 >> podmienka je splnená, fyzické teplo je uvažované

Ďalej sa určí tepelná kapacita tuhého paliva podľa vzorca:

$$c_{pv} = 4,19 \cdot W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r) \quad (3-2)$$

$$c_{pv} = 4,19 \cdot 0,4148 + 1,13 \cdot (1 - 0,4148) = 2,399 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{su} = 1,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{- merné teplo sušiny pre hnedé uhlie}$$

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} \quad (3-3)$$

$$i_{pv} = 2,399 \cdot 20 = 47,986 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$t_{pv} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{- teplota paliva}$$

Teplo privedené cudzím zdrojom

$$Q_{cz} = \beta'_{OVZ} \cdot \Delta I_{VVmin} \quad (3-4)$$

$$Q_{cz} = 1,18 \cdot 105,4154 = 124,082 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

β'_{OVZ} [-] - súčiniteľ prebytku vzduchu na vstupe do ohrievača vzduchu

ΔI_{VVmin} [kJ/kg] - zvýšenie entalpie stechiometrického množstva vzduchu

Redukovaná výhrevnosť paliva

$$Q_{i \text{ red}} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz} \quad (3-5)$$

$$Q_{i \text{ red}} = 13851 + 47,986 + 124,082 = 14020,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.2 Tepelné straty kotla a účinnosť

Pri spaľovaní tuhých palív sa uvažuje 5 základných strát:

- strata mechanickým nedopalom Z_c
- strata chemickým nedopalom Z_{co}
- strata sálaním a vedením tepla do okolia Z_{sv}
- strata fyzickým teplom tuhých zvyškov Z_f
- strata citelným teplom spalín (komínová) Z_k

3.2.1 Strata mechanickým nedopalom

Predstavuje stratu nespálenou horľavinou v tuhých zvyškoch.

Strata v škváre alebo struske

$$Z_{cs} = \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot Q_{ci} \cdot 100 \quad (3-6)$$

$$Z_{cs} = \frac{0,1}{1 - 0,1} \cdot 0,08 \cdot \frac{0,0789}{14020,2} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,163 \%$$

Strata v úlete

$$Z_{cú} = \frac{C_ú}{1 - C_ú} \cdot X_ú \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot Q_{ci} \cdot 100 \quad (3-7)$$

$$Z_{cú} = \frac{0,03}{1 - 0,03} \cdot 0,87 \cdot \frac{0,0789}{14020,2} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,494 \%$$

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} \quad (3-8)$$

$$Z_c = 0,163 + 0,494 = 0,657 \%$$

| | |
|------------------|-----------------------------|
| C_s [-] | - podiel horľaviny v škváre |
| $C_ú$ [-] | - podiel horľaviny v úlete |
| X_s [-] | - podiel popola v škváre |
| $X_ú$ [-] | - podiel popola v úlete |
| Q_{ci} [kJ/kg] | - výhrevnosť horľaviny |

3.2.2 Strata chemickým nedopalom

Taktiež strata horľavinou v spalinách, je spôsobená nedokonalým spaľovaním paliva. Vyjadruje teplo stratené v dôsledku prítomnosti nespálených plynov v spalinách.

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot \text{mgCO} \cdot O_{SS\text{min}}}{(1 - O_{2\text{ref}}) \cdot Q_{i \text{ red}}} \cdot 100 \quad (3-9)$$

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 3,71}{(21 - 6) \cdot 14020,2} \cdot 100 = 0,037 \%$$

O_{2ref} [%] - obsah kyslíka pre referenčný stav spalín
 $mgCO$ [mg/Mn³] - emisný limit CO

3.2.3 Strata sálaním a vedením tepla do okolia

Táto strata zohľadňuje množstvo tepla, ktoré uniká plášťom kotla do okolia. Závisí na kvalite izolácie stien, veľkosti povrchu, spôsobe oplechovania a výkone kotla. Je volená na základe grafu pre stratu zdieľaním tepla do okolia [4].

$$Z_{sv} = 0,5 \%$$

3.2.4 Strata fyzickým teplom tuhých zvyškov

Skladá sa podobne ako strata mechanickým nedopalom zo straty v škváre či struske, popolčeka, úlete a prepade.

Strata fyzickým teplom v tuhých zvyškoch v škváre alebo struske

$$Z_{fs} = \frac{X_s}{1 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}} \cdot c_s \cdot t_{sk} \cdot 100 \quad (3-10)$$

$$Z_{fs} = \frac{0,08}{1 - 0,1} \cdot \frac{0,0789}{14020,2} \cdot 0,95934 \cdot 860 \cdot 100 = 0,041 \%$$

Strata fyzickým teplom v tuhých zvyškoch v úlete

$$Z_{fú} = \frac{X_u}{1 - C_u} \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}} \cdot c_u \cdot t_u \cdot 100 \quad (3-11)$$

$$Z_{fú} = \frac{0,87}{1 - 0,03} \cdot \frac{0,0789}{14020,2} \cdot 0,8433 \cdot 180 \cdot 100 = 0,079 \%$$

c_s [kJ · kg⁻¹ · K⁻¹] - merná tepelná kapacita tuhých zvyškov pre teplotu 860 °C

c_u [kJ · kg⁻¹ · K⁻¹] - merná tepelná kapacita tuhých zvyškov pre teplotu 180 °C

t_{sk} [°C] - teplota škváry

t_u [°C] - teplota úletu

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fú} \quad (3-12)$$

$$Z_f = 0,041 + 0,079 = 0,12 \%$$

3.2.5 Strata citel'ným teplom spalín (komínová)

Predstavuje teplo odchádzajúce z kotla v plynných spalínach. Je to najvýznamnejšia strata, ktorá najviac ovplyvňuje výslednú účinnosť kotla. Závisí na teplote spalín a súčiniteli prebytku vzduchu v spalínach za kotlom. Uvažované pre teplotu spalín za kotlom 180 °C.

$$Z_k = (1 - Z_c) \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - \alpha_k \cdot I_{VZ}}{Q_{i,red}} \cdot 100 \quad (3-13)$$

$$Z_k = (1 - 0,00657) \frac{1631,457 - 1,38 \cdot 169,368}{14020,2} \cdot 100 = 9,904 \%$$

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| $I_S^{t_k, \alpha_k}$ [kJ/kg] | - entalpia spalín na vstupe do komína |
| I_{VZ} [kJ/kg] | - entalpia vzduchu |
| α_k [-] | - prebytok vzduchu za kotlom |

3.2.6 Tepelná účinnosť kotla

$$\eta_k = 100 - \sum Z = 100 - (Z_c + Z_{co} + Z_{sv} + Z_f + Z_k) \quad (3-14)$$

$$\eta_k = 100 - (0,657 + 0,037 + 0,5 + 0,12 + 9,904) = 88,782 \%$$

3.3 Výrobné teplo pary a množstvo paliva

3.3.1 Výrobné teplo pary

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_w - i_{nv}) \quad (3-15)$$

$$Q_v = 65,278 \cdot (3434,2 - 903,24) + 0,005 \cdot 65,278 \cdot (1618 - 903,24) = 165,449 \text{ MW}$$

| | |
|------------------|--|
| i_{pp} [kJ/kg] | - entalpia prehriatej pary o teplote 540 °C a tlaku 14 MPa |
| i_{nv} [kJ/kg] | - entalpia napájacej vody o teplote 210°C a tlaku 16,7 MPa |
| i_w [kJ/kg] | - entalpia sýtej vody v bubne pri tlaku 15,2 MPa |
| M_o [kg/s] | - množstvo odluhu, tvorí 0,5 % množstva prehriatej pary |
| M_{pp} [kg/s] | - množstvo prehriatej pary |

3.3.2 Množstvo paliva

Skutočné množstvo paliva privedeného do kotla

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{i red} \cdot \eta_k} \quad (3-16)$$

$$M_{pal} = \frac{165,449}{14,020 \cdot 88,782} = 47,851 \frac{t}{h}$$

Výpočtové množstvo spáleného paliva

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot (1 - Z_c) \quad (3-17)$$

$$M_{pv} = 47,851 \cdot (1 - 0,657) = 47,536 \frac{t}{h}$$

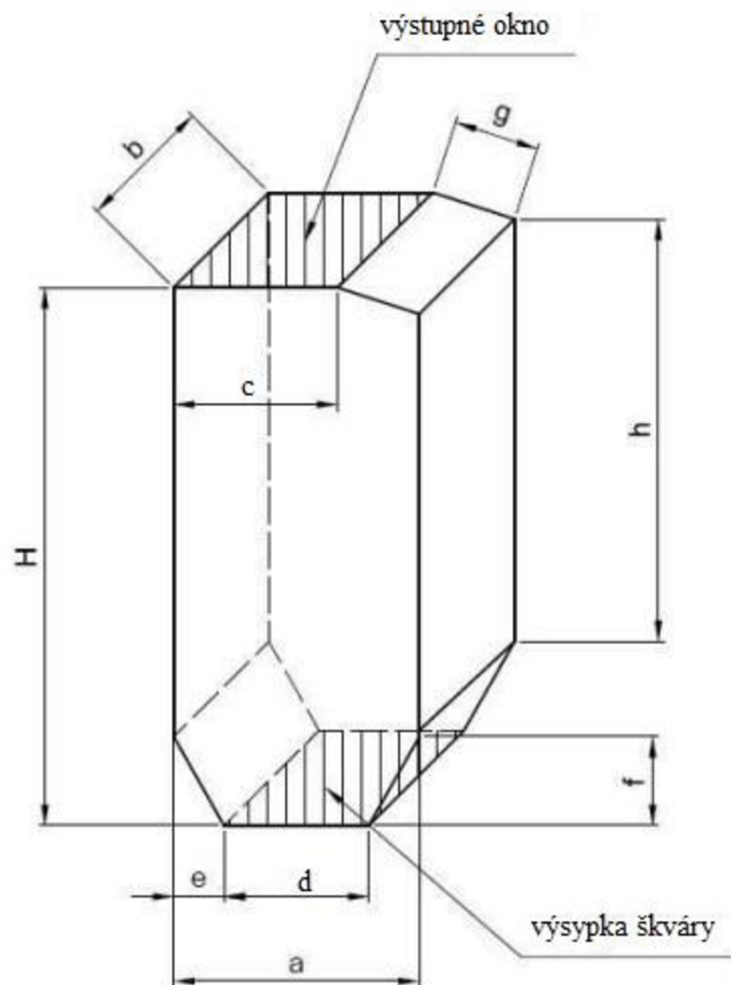
4 Výpočet spalovací komory

Spalovací komora kotla, tiež nazývaná ohnisko, je priestor do ktorého je horákmi privádzaný spaľovací vzduch a palivo, ktoré tu horí a uvoľňuje teplo za vzniku spalín. Je to časť kotla, kde sú teploty a tepelné toky najvyššie. Priestor ohniska je za prevádzky z väčšej časti zaplnený plameňom, preto sa necháva celý voľný. Ohnisko musí umožňovať kontinuálny odvod tuhých zvyškov po spaľovaní (výsyпка) a teplota odchádzajúcich spalín, respektíve úletu v nich musí byť dostatočne nízka, aby nedošlo k zastruskovaniu nasledujúcich výhrevných plôch. [4]

Rozmery spaľovacej komory vychádzajú z firemných podkladov [6]. V spaľovacej komore je umiestnených 8 tangenciálnych horákov v dvoch radoch.

Tab. 4-1 Rozmery spaľovacej komory

| | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Šírka spaľovacej komory | $a = 8,280 \text{ m}$ | Výška spodného skosenia | $f = 3,000 \text{ m}$ |
| Hĺbka spaľovacej komory | $b = 9,080 \text{ m}$ | Dĺžka horného skosenia | $g = 2,902 \text{ m}$ |
| Šírka výstupného okna | $c = 5,527 \text{ m}$ | Výška horného skosenia | $h = 0,897 \text{ m}$ |
| Šírka výsyanky škváry | $d = 4,890 \text{ m}$ | Celková výška spaľ. komory | $H = 18,170 \text{ m}$ |
| Šírka spodného skosenia | $e = 1,695 \text{ m}$ | Rozmery horáka | $0,8 \times 2 \text{ m}$ |



Obr. 4-1 Schéma spaľovacej komory

4.1 Aktivny objem ohniska

$$V_o = a \cdot b \cdot H - e \cdot f \cdot b - \frac{(a - c) \cdot h \cdot b}{2} \quad (4-1)$$

$$V_o = 8,28 \cdot 9,08 \cdot 18,17 - 1,695 \cdot 3 \cdot 9,08 - \frac{(8,28 - 5,527) \cdot 0,897 \cdot 9,08}{2} = 1308,68 \text{ m}^3$$

Objemové tepelné zat'azenie ohniska

$$q_v = \frac{M_{\text{pal}} \cdot Q_i^r}{V_o} \quad (4-2)$$

$$q_v = \frac{13,292 \cdot 13851}{1308,68} = 139,756 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

4.2 Plochy ohniska

Plocha výstupného okna

$$S_{v_o} = b \cdot c \quad (4-3)$$

$$S_{v_o} = 9,08 \cdot 5,527 = 50,185 \text{ m}^2$$

Plocha horákov

$$S_h = 8 \cdot 0,8 \cdot 2 = 12,8 \text{ m}^2 \quad (4-4)$$

Plocha stien s trubkami

$$S_{\text{str}} = (H - f) \cdot b + (H - h - f) \cdot b + 2 \cdot \sqrt{e^2 + f^2} \cdot b + g \cdot b + 2 \cdot \left[(H - f) \cdot a - (a - c) \cdot \frac{h}{2} \right] + 2 \cdot \frac{a + d}{2} \cdot f - S_h \quad (4-5)$$

$$S_{\text{str}} = (18,17 - 3) \cdot 9,08 + (18,17 - 0,897 - 3) \cdot 9,08 + 2 \cdot \sqrt{1,695^2 + 3^2} \cdot 9,08 + 2,902 \cdot 9,08 + 2 \cdot \left[(18,17 - 3) \cdot 8,28 - (8,28 - 5,527) \cdot \frac{0,897}{2} \right] + 2 \cdot \frac{8,28 + 4,89}{2} \cdot 3 - 12,8 = 631,723 \text{ m}^2$$

Plocha výsyvky škváry

$$S_{v_{\text{š}}} = d \cdot b \quad (4-6)$$

$$S_{v_{\text{š}}} = 4,89 \cdot 9,08 = 44,401 \text{ m}^2$$

Celkový povrch stien ohniska

$$S_{st} = S_{vo} + S_{str} + S_{vš} \quad (4-7)$$

$$S_{st} = 50,185 + 631,723 + 44,401 = 726,309 \text{ m}^2$$

4.3 Výpočet ohniska z hľadiska prenosu tepla

Cieľom tepelného výpočtu ohniska je určenie strednej teploty odchádzajúcich spalín t_{ok} . Prenos tepla v tomto priestore sa deje hlavne sálaním. Výpočet je založený na princípoch teórie podobnosti tepelných procesov prebiehajúcich v spaľovacej komore. [4]

Pre výpočet je potrebné najskôr zvoliť teplotu spalín na konci ohniska, s jej využitím vyjadriť potrebné parametre a vypočítať koncovú teplotu. Pokiaľ sa vypočítaná teplota líši od zvolenej o ± 50 °C, vypočítaná hodnota sa môže považovať za správnu. Zvolená hodnota teploty spalín na konci ohniska je $t_{ok} = 1230$ °C

4.3.1 Teplota nechladeného plameňa**Teplo privedené vo vzduchu**

$$Q_{vz} = (\alpha_{ok} - \Delta\alpha_0 - \Delta\alpha_{ml}) \cdot I_V^{t_{ovz}} + (\Delta\alpha_0 + \Delta\alpha_{ml}) \cdot I_V^{t_f} \quad (4-8)$$

$$Q_{vz} = (1,27 - 0,09 - 0,10) \cdot 1891,101 + (0,09 + 0,10) \cdot 169,367 = 2054,046 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

| | |
|-------------------------|--|
| $\Delta\alpha_0$ [-] | - prisávanie v ohnisku [6] |
| $\Delta\alpha_{ml}$ [-] | - prisávanie vzduchu v mlynici [6] |
| $I_V^{t_{ovz}}$ [kJ/kg] | - entalpia riadeného vzduchu do kotla s teplotou 350°C |
| $I_V^{t_f}$ [kJ/kg] | - entalpia prisávaného vzduchu s teplotou 32 °C |

Celkové užitočné teplo uvoľnené v ohnisku

$$Q_u = Q_{i \text{ red}} \cdot (1 - Z_{co} - Z_c - Z_f) + Q_{vz} - Q_{cz} \quad (4-9)$$

$$Q_u = 14020,2 \cdot (1 - 0,037 - 0,657 - 0,12) + 2054,046 - 124,082 = 15,658 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

- pre túto entalpiu odpovedá teplota nechladeného plameňa $t_{np} = 1624,99$ °C

4.3.2 Boltzmannovo číslo

Je to bezrozmerné podobnostné kritérium definované pre účely výpočtu ohnisk.

Pomerná strata sálaním a vedením tepla do okolia

$$Z_{sv}^o = \frac{Z_{sv}}{\eta_k + Z_{sv}} \quad (4-10)$$

$$Z_{sv}^o = \frac{0,5}{88,782 + 0,5} = 0,0056$$

Stredná tepelná pohltivosť spalín v ohnisku

$$(O_S c_S)_o = \frac{Q_u - I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} \quad (4-11)$$

$$(O_S c_S)_o = \frac{15658 - 11452,034}{1624,99 - 1230} = 10,649 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}$ [kJ/kg] - entalpia spalín pri výstupe z ohniska pre teplotu 1230 °C a prebytok vzduchu 1,27

Súčiniteľ tepelnej efektívnosti stien

$$\psi = x \cdot \zeta = 1 \cdot 0,45 = 0,45 \quad (4-12)$$

x [-] - uhlový súčiniteľ osálenia [4]

ζ [-] - súčiniteľ zanesenia stien ohniska [4]

$$Bo = \frac{(1 - Z_{sv}^o) \cdot M_{pv} \cdot (O_S c_S)_o}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot S_{st} \cdot (273 + t_{np})^3} \quad (4-13)$$

$$Bo = \frac{(1 - 0,0056) \cdot 13,205 \cdot 10,649}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 726,309 \cdot (273 + 1624,99)^3} = 1,122$$

4.3.3 Súčiniteľ M

$M = 0,29$ - hodnota určená na základe podkladov z firmy [6]

4.3.4 Stupeň černosti ohniska

Hmotnosť spalín G_S

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{ok} \cdot O_{VVmin} \quad (4-14)$$

$$G_S = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,27 \cdot 3,982 = 7,526 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentrácia popola v spalínach

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_u + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (4-15)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,526} = 0,00983$$

Súčiniteľ zoslabenia sáľania popolčekovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (4-16)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0093}{\sqrt[3]{(1230 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,687$$

$d_{pk} [\mu m]$ - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Objemové podiely trojatómových plynov v spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (4-17)$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,27 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,27 - 1) \cdot 3,982} = 0,186$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (4-18)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,27 - 1) \cdot 3,982} = 0,118$$

$$r_S = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (4-19)$$

$$r_S = 0,186 + 0,118 = 0,304$$

Účinná hrúbka sáľavej vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{138,868}{726,309} = 6,487 \quad (4-20)$$

Parciálny tlak trojatómových plynov v spalinách

$$p_s = r_S \cdot p = 0,304 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (4-21)$$

$p [\text{MPa}]$ - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sáľania trojatómovými plynmi

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S \quad (4-22)$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,186}{\sqrt{0,03 \cdot 6,487}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1230 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,304 = 0,915$$

Optická hustota plameňa

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_p \cdot \mu_{pk} + k_{kok} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2) \cdot p \cdot s \quad (4-23)$$

$$k \cdot p \cdot s = (0,915 + 0,687 + 10 \cdot 0,5 \cdot 0,1) \cdot 0,101 \cdot 6,487 = 1,377$$

k_{kok} [-] - súčiniteľ zoslabenia sáľania koksovými časticami [4]

κ_1, κ_2 [-] - charakteristiky zohľadňujúce koncentráciu koksíku v plameni v závislosti na druhu paliva a spôsobe spaľovania [4]

Stupeň černosti plameňa

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,377} = 0,744 \quad (4-24)$$

$$a_o = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi} \quad (4-25)$$

$$a_o = \frac{0,744}{0,744 + (1 - 0,744) \cdot 0,45} = 0,866$$

4.3.5 Teplota spalín na konci ohniska

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{Bo} \right)^{0,6}} \quad (4-26)$$

$$t_{ok} = \frac{1624,99 + 273,15}{1 + 0,29 \cdot \left(\frac{0,866}{1,122} \right)^{0,6}} = 1249 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítaná hodnota teploty spalín na konci ohniska sa od zvolenej líši o 19 °C, teda splňuje podmienku.

$$I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}} = 11650,044 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad - \text{entalpia spalín na výstupe z ohniska pre teplotu } 1249 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.3.6 Množstvo tepla odovzdaného v ohnisku do stien**Tepelný výkon zachytený v priestore ohniska**

$$Q_o = M_{pv} \cdot (Q_u - I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}} - Z_{sv}^o \cdot Q_{i red}) \quad (4-27)$$

$$Q_o = 13,205 \cdot (15658 - 11650,044 - 0,0056 \cdot 14020,2) = 52198,293 \text{ kW}$$

Stredný tepelný tok do stien

účinná sálavá plocha stien ohniska

$$S_{ús} = x \cdot S_{str} = 1 \cdot 631,723 = 631,723 \text{ m}^2 \quad (4-28)$$

účinná sálavá plocha výstupného prierezu ohniska

$$S_{úsvo} = S_{vo} \cdot \delta \cdot y_h = 50,185 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 28,104 \text{ m}^2 \quad (4-29)$$

- x [-] - uhlový súčiniteľ osálenia trubkovej steny [4]
 δ [-] - súčiniteľ vyjadrujúci podiel tepelného toku výstupným prierezom a do stien v mieste výstupného prierezu [4]
 y_h [-] - súčiniteľ tepelnej nerovnomernosti po výške ohniska [4]

$$q_{st} = \frac{Q_o}{S_{úsvo} + S_{ús}} \quad (4-30)$$

$$q_{st} = \frac{52198,293}{28,104 + 631,723} = 79,109 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Tepelný výkon pripadajúci na trubky výparníka

$$Q_{pl} = q_{st} \cdot S_{ús} = 79,109 \cdot 631,723 = 50046,360 \text{ kW} \quad (4-31)$$

Tepelný výkon pripadajúci na výstupný prierez ohniska

$$Q_{ods} = q_{st} \cdot S_{úsvo} = 79,109 \cdot 28,104 = 2151,933 \text{ kW} \quad (4-31)$$

5 Návrh konvekčných plôch

5.1 Zadané hodnoty

Výpočet konvekčných plôch vychádza z požadovaných parametrov prehriatej pary na výstupe z kotla a parametrov napájacej vody. Kotel sa skladá z týchto konvekčných plôch: výparník (VYP), ekonomizér (EKO), stropný prehrievač pary SH1, prehrievač pary SH2, doskový prehrievač pary SH3 a výstupný prehrievač pary SH4. K určení entalpií a teplôt pary, respektíve vody v jednotlivých konvekčných plochách bol použitý program XSTEAM tables [7].

Tab. 5-1 Zadané hodnoty

| | | | |
|------------------------|----------|--------|------|
| Parný výkon | M_{pp} | 65,278 | kg/s |
| Výstupná teplota pary | t_{pp} | 540 | °C |
| Výstupný tlak pary | p_{pp} | 14 | MPa |
| Teplota napájacej vody | t_{nv} | 210 | °C |
| Tlak napájacej vody | p_{nv} | 16,7 | MPa |

5.2 Tlakové straty konvekčných plôch

Tab. 5-2 Tlakové straty konvekčných plôch

| | Tlakové straty | | |
|----------------|------------------|------|-----|
| Ekonomizér | Δp_{EKO} | 0,3 | MPa |
| Výparník | Δp_{VYP} | 0 | MPa |
| Prehrievač SH1 | Δp_{SH1} | 0,3 | MPa |
| Prehrievač SH2 | Δp_{SH2} | 0,4 | MPa |
| Prehrievač SH3 | Δp_{SH3} | 0,17 | MPa |
| Prehrievač SH4 | Δp_{SH4} | 0,33 | MPa |

5.3 Hodnoty vstrekov a odluhu

Teplota pary na výstupe z kotla nemôže kolísať o viac ako 10 °C, čo je zaistené správnym dimenzovaním regulačných vstrekov. Pretože prevádzka kotla kolíše, teplota pary kolíše pri zmene výkonu kotla (napr. náhla zmena kvality hnědého uhlia), je dimenzovanie prietoku napájacej vody do vstrekov o 50 % vyššie ako je vypočítané množstvo napájacej vody pre menovitý výkon. Množstvo odluhu tvorí 0,5 % z množstva prehriatej pary podľa podkladov z firmy [6].

Tab. 5-3 Vstreky a odluh

| | | | |
|----------|-----------|-------|------|
| Vstrek 1 | M_{vs1} | 5 | kg/s |
| Vstrek 2 | M_{vs2} | 5 | kg/s |
| Odluh | M_o | 0,326 | kg/s |

5.4 Tepelná bilancia na strane média

V této kapitole je celkový výkon kotla rozdělený do jednotlivých výhrevných plůch. Potřebné hodnoty média sú určené podľa [7] a entalpie vzduchu sú odčítané z Tab. 2-4.

5.4.1 Prehrievač SH4

Tab. 5-4 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH4

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{SH4}^{in} | 439,03 | °C | teplota | t_{SH4}^{out} | 540 | °C |
| tlak | p_{SH4}^{in} | 14,33 | MPa | tlak | p_{SH4}^{out} | 14 | MPa |
| entalpia | i_{SH4}^{in} | 3134,200 | kJ/kg | entalpia | i_{SH4}^{out} | 3434,200 | kJ/kg |

Tepelný výkon prehrievača SH4

$$Q_{SH4} = M_{pp} \cdot (i_{SH4}^{out} - i_{SH4}^{in}) \quad (5-1)$$

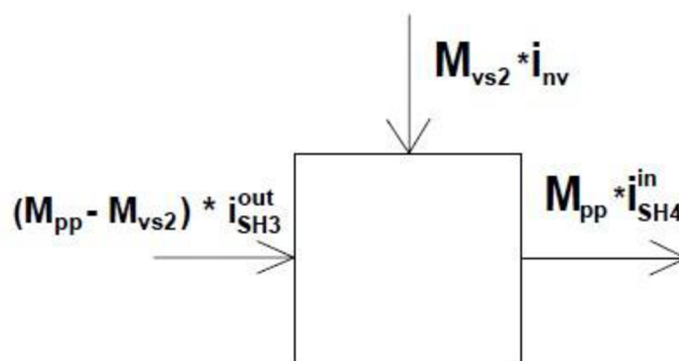
$$Q_{SH4} = 65,278 \cdot (3434,2 - 3134,2) = 19583,333 \text{ kW}$$

5.4.2 Prehrievač SH3

Tab. 5-5 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH3

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{SH3}^{in} | 402,5 | °C | teplota | t_{SH3}^{out} | 499,75 | °C |
| tlak | p_{SH3}^{in} | 14,5 | MPa | tlak | p_{SH3}^{out} | 14,33 | MPa |
| entalpia | i_{SH3}^{in} | 2999,257 | kJ/kg | entalpia | i_{SH3}^{out} | 3319,257 | kJ/kg |

Bilancia vstrekov



Obr. 5-1 Schéma vstreku 2

$$(M_{pp} - M_{vs2}) \cdot i_{SH3}^{out} + M_{vs2} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{SH4}^{in}$$

Entalpia na výstupe

$$i_{SH3}^{out} = \frac{M_{pp} \cdot i_{SH4}^{in} - M_{vs2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{vs2}} \quad (5-2)$$

$$i_{SH3}^{out} = \frac{65,278 \cdot 3134,2 - 5 \cdot 903,24}{65,278 - 5} = 3319,257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tepelný výkon prehrievača SH3

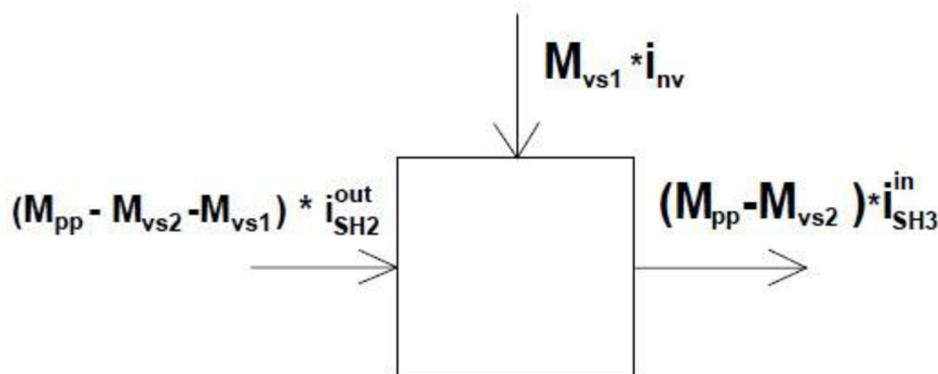
$$Q_{SH3} = (M_{pp} - M_{vs2}) \cdot (i_{SH3}^{out} - i_{SH3}^{in}) \quad (5-3)$$

$$Q_{SH3} = (65,278 - 5) \cdot (3319,257 - 2999,257) = 19288,889 \text{ kW}$$

5.4.3 Prehrievač SH2

Tab. 5-6 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH2

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{SH2}^{in} | 348,78 | °C | teplota | t_{SH2}^{out} | 456,95 | °C |
| tlak | p_{SH2}^{in} | 14,9 | MPa | tlak | p_{SH2}^{out} | 14,5 | MPa |
| entalpia | i_{SH2}^{in} | 2688,846 | kJ/kg | entalpia | i_{SH2}^{out} | 3188,846 | kJ/kg |

Bilancia vstrekov

Obr. 5-2 Schéma vstreku 1

$$(M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot i_{SH2}^{out} + M_{vs1} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{vs2}) \cdot i_{SH3}^{in}$$

Entalpia na výstupe

$$i_{SH2}^{out} = \frac{(M_{pp} - M_{vs2}) \cdot i_{SH3}^{in} - M_{vs1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}} \quad (5-4)$$

$$i_{SH2}^{out} = \frac{(65,278 - 5) \cdot 2999,257 - 5 \cdot 903,24}{65,278 - 5 - 5} = 3188,846 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tepelný výkon prehrievača SH2

$$Q_{SH2} = (M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (i_{SH2}^{out} - i_{SH2}^{in}) \quad (5-5)$$

$$Q_{SH2} = (65,278 - 5 - 5) \cdot (3188,846 - 2688,846) = 27638,889 \text{ kW}$$

5.4.4 Prehrievač SH1

Tab. 5-7 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{SH1}^{in} | 343,22 | °C | teplota | t_{SH1}^{out} | 348,78 | °C |
| tlak | p_{SH1}^{in} | 15,2 | MPa | tlak | p_{SH1}^{out} | 14,9 | MPa |
| entalpia | i_{SH1}^{in} | 2605,100 | kJ/kg | entalpia | i_{SH1}^{out} | 2688,846 | kJ/kg |

Tepelný výkon prehrievača SH1

$$Q_{SH1} = (M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (i_{SH1}^{out} - i_{SH1}^{in}) \quad (5-6)$$

$$Q_{SH1} = (65,278 - 5 - 5) \cdot (2688,846 - 2605,100) = 4629,294 \text{ kW}$$

5.4.5 Výparník

Tab. 5-8 Parametre pary/vody na vstupe a výstupe z výparníka

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{VYP}^{in} | 303,22 | °C | teplota | t_{VYP}^{out} | 343,22 | °C |
| tlak | p_{VYP}^{in} | 15,2 | MPa | tlak | p_{VYP}^{out} | 15,2 | MPa |
| entalpia | i_{VYP}^{in} | 1355,600 | kJ/kg | entalpia | i_{VYP}^{out} | 2605,100 | kJ/kg |

Tepelný výkon výparníku

$$Q_{VYP} = (M_{pp} - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (i_{VYP}^{out} - i_{VYP}^{in}) \quad (5-7)$$

$$Q_{VYP} = (65,278 - 5 - 5) \cdot (2605,100 - 1355,600) = 69069,583 \text{ kW}$$

5.4.6 Ekonomizér

Tab. 5-9 Parametre vody na vstupe a výstupe z ekonomizéra

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|---------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{EKO}^{in} | 210 | °C | teplota | t_{EKO}^{out} | 303,22 | °C |
| tlak | p_{EKO}^{in} | 15,5 | MPa | tlak | p_{EKO}^{out} | 15,2 | MPa |
| entalpia | i_{EKO}^{in} | 902,760 | kJ/kg | entalpia | i_{EKO}^{out} | 1355,600 | kJ/kg |

Tepelný výkon ekonomizéra

$$Q_{EKO} = (M_{pp} + M_O - M_{vs2} - M_{vs1}) \cdot (i_{EKO}^{out} - i_{EKO}^{in}) \quad (5-8)$$

$$Q_{EKO} = (65,278 + 0,326 - 5 - 5) \cdot (1355,600 - 902,760) = 25179,791 \text{ kW}$$

5.4.7 Ohřevač vzduchu

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|----------------|---------|-------|------------------|-----------------|----------|-------|
| teplota | t_{OVZ}^{in} | 60 | °C | teplota | t_{OVZ}^{out} | 350 | °C |
| entalpia | i_{OVZ}^{in} | 317,560 | kJ/kg | entalpia | i_{OVZ}^{out} | 1891,101 | kJ/kg |

Tepelný výkon ohřevaču vzduchu

$$Q_{OVZ} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{EKO}^{out} - i_{EKO}^{in}) \quad (5-9)$$

$$Q_{OVZ} = 13,205 \cdot 1,08 \cdot (1891,101 - 317,560) = 22440,898 \text{ kW}$$

5.4.8 Celkový tepelný výkon

$$Q_C = Q_{EKO} + Q_{VYP} + Q_{SH1} + Q_{SH2} + Q_{SH3} + Q_{SH4} \quad (5-10)$$

$$Q_C = 25179,791 + 69069,583 + 4629,294 + 27638,889 + 19288,889 + 19583,333 \\ = 165389,780 \text{ kW}$$

Tab. 5-10 Tepelná bilancia na strane média

| Konvekčné plochy | | tlak | teplota | entalpia | tepelný výkon |
|------------------|--------|-------|---------|----------|---------------|
| | | [MPa] | [°C] | [kJ/kg] | [kW] |
| SH4 | výstup | 14 | 540 | 3434,200 | 19583,333 |
| | vstup | 14,33 | 439,03 | 3135,200 | |
| SH3 | výstup | 14,33 | 499,75 | 3319,257 | 19288,889 |
| | vstup | 14,5 | 402,5 | 2999,257 | |
| SH2 | výstup | 14,5 | 456,95 | 3188,846 | 27638,889 |
| | vstup | 14,9 | 348,78 | 2688,846 | |
| SH1 | výstup | 14,9 | 348,78 | 2688,846 | 4629,294 |
| | vstup | 15,2 | 343,22 | 2605,100 | |
| Výparník | výstup | 15,2 | 343,22 | 2605,100 | 69069,583 |
| | vstup | 15,2 | 303,22 | 1355,600 | |
| Ekonomizér | výstup | 15,2 | 303,22 | 1355,600 | 25179,791 |
| | vstup | 15,5 | 210 | 902,760 | |

5.5 Tepelná bilancia na strane spalín

Entalpie spalín na vstupe a výstupe z konvekčných plôch sa získajú pomocou rovnice 5-11. Následne sa z Tab. 2-4 aproximáciou určia teploty spalín. Teplota spalín na vstupe do doskového prehrievača SH3 sa rovná teplote na konci ohniska.

$$i_i^{in} = \frac{Q_i + M_{pv} \cdot i_i^{out}}{M_{pv}} \rightarrow t_i^{in} [°C] \quad (5-11)$$

Ukážkový výpočet teploty spalín pre ohřevač vzduchu:

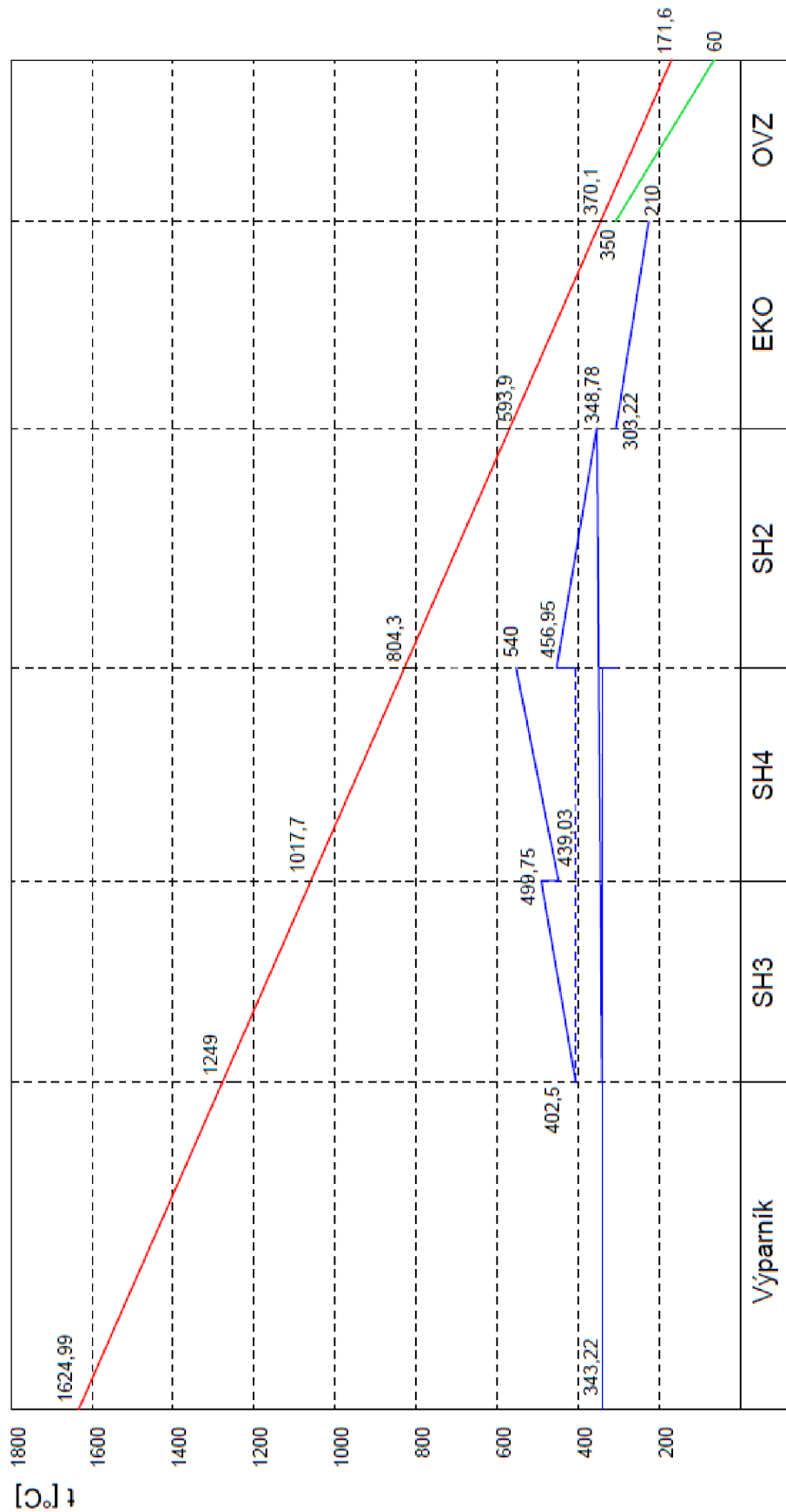
$$i_{OVZ}^{in} = \frac{22440,898 + 13,205 \cdot 1503,121}{13,205} = 3202,545 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{OVZ}^{in} = 370,1 \text{ °C}$$

i - typ konvekčnej plochy
 Q_i [kW] - teplo odobrané konvekčnou plochou

Tab. 5-11 Tepelná bilancia na strane spalín

| Konvekčná plocha | | teplota | entalpia |
|------------------------|--------|---------|-----------|
| | | [°C] | [kJ/kg] |
| SH3 | vstup | 1249 | 11650,044 |
| | výstup | 1017,7 | 9267,582 |
| SH4 | vstup | 1017,7 | 9267,582 |
| | výstup | 804,3 | 7182,557 |
| SH2 | vstup | 804,3 | 7182,557 |
| | výstup | 593,9 | 5163,958 |
| Ekonomizér (EKO) | vstup | 593,9 | 5163,958 |
| | výstup | 370,1 | 3202,545 |
| Ohrievač vzduchu (OVZ) | vstup | 370,1 | 3202,545 |
| | výstup | 171,6 | 1503,121 |

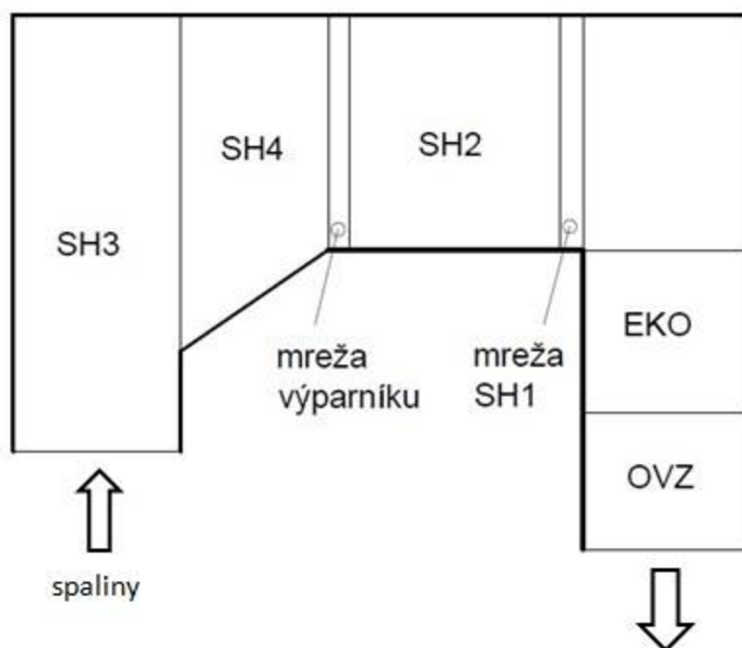
5.6 Pilový diagram



Obr. 5-3 Pilový diagram

6 Rozvrhnutie výpočtu konvekčných plôch

Výpočet spalinového kanála je rozdelený do niekoľkých častí, v ktorých je riešený prestup tepla konvekciou a sálaním pre hlavné a taktiež paralelné konvekčné plochy. Výpočet začína na konci spaľovacej komory, ďalej spaliny pri prechode spalinovým kanálom odovzdávajú tepelnú energiu a chladnú až na požadovanú výstupnú teplotu.



Obr. 6-1 Rozvrhnutie výpočtu konvekčných plôch

Tab. 6-1 Rozvrhnutie výpočtu konvekčných plôch

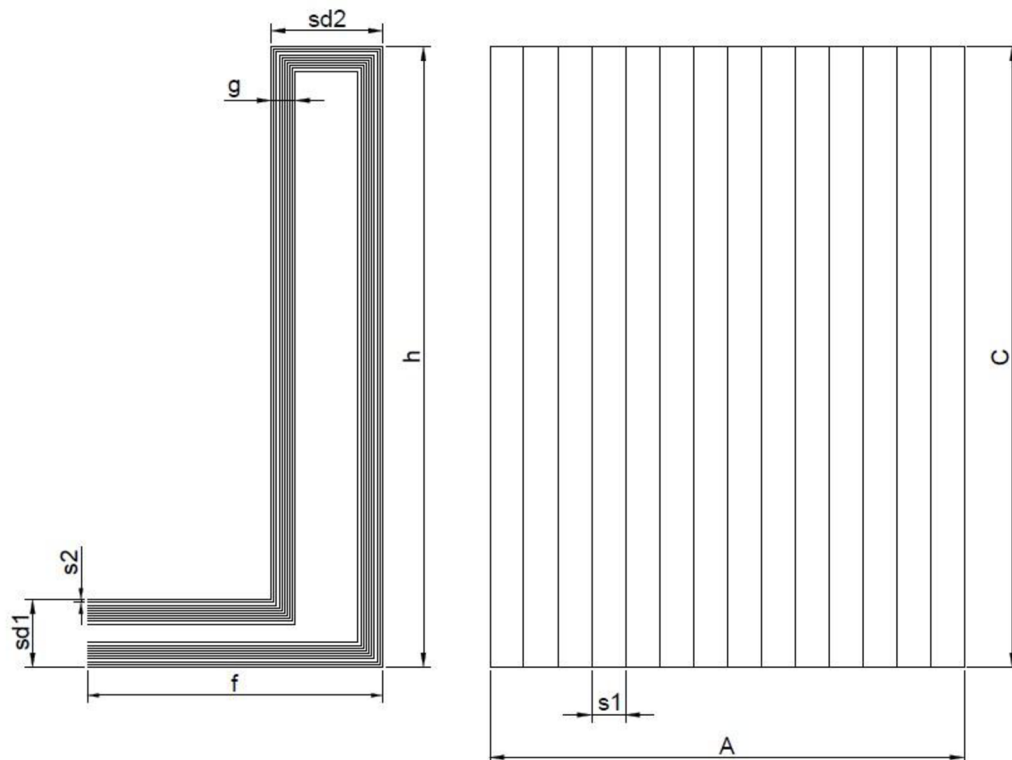
| Hlavná plocha | Paralelná plocha |
|---------------------------------|---|
| doskový prehrievač SH3 | prvý úsek stropného prehrievača SH1 trubky výparníka na stenách |
| výstupný prehrievač SH4 | druhý úsek stropného prehrievača SH1 trubky výparníka na stenách |
| mreža výparníka | tretí úsek stropného prehrievača SH1 |
| prehrievač SH2 | štvrtý úsek stropného prehrievača SH1 |
| mreža stropného prehrievača SH1 | - |
| ekonomizér (EKO) | - |
| ohrievač vzduchu (OVZ) | - |

7 Doskový prehrievač SH3

Doskový prehrievač je tvorený zväzkami trubiek, ktoré sú usporiadané do zvislých rovnobežných dosiek. Steny ťahu sú tvorené paralelnými plochami – trubky výparníka na stenách a prvý úsek stropného prehrievača SH1.

7.1 Návrh geometrie

Geometria doskového prehrievača



Obr. 7-1 Geometria doskového prehrievača SH3

| | |
|--------------------------|--|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 38,1 \text{ mm} = 0,0381 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5,63 \text{ mm} = 0,00563 \text{ m}$ |
| Vnútorný priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 38,1 - 2 \cdot 5,63 = 26,84 \text{ mm} = 0,02684 \text{ m}$ |
| Rozteč dosiek: | $s_1 = 600 \text{ mm} = 0,6 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_2 = 48 \text{ mm} = 0,048 \text{ m}$ |
| Počet dosiek: | $n_d = 15$ |
| Počet trubiek v doske: | $n_{tr} = 10$ |
| Pozdĺžna šírka dosky: | $s_{d1} = 1194 \text{ mm} = 1,194 \text{ m}$ |
| Priečna šírka dosky: | $s_{d2} = 1974 \text{ mm} = 1,974 \text{ m}$ |
| Spodná šírka dosky: | $j = 5224 \text{ mm} = 5,224 \text{ m}$ |
| Rozmer dosky: | $k = 477 \text{ mm} = 0,477 \text{ m}$ |
| Výška dosky: | $l = 10992 \text{ mm} = 10,992 \text{ m}$ |

Plocha 1 dosky

$$S_d = 2 \cdot [s_{d1} \cdot j + (l - s_{d1}) \cdot s_{d2} - (l - 2 \cdot k) \cdot (s_{d2} - 2 \cdot k)] + D \quad (7-1)$$

$$\cdot [2 \cdot j + 2 \cdot l - s_{d1} + 2 \cdot (l - s_{d1}) + 2 \cdot (s_{d2} - 2 \cdot k)]$$

$$S_d = 2 \cdot [1,194 \cdot 5,224 + (10,992 - 1,194) \cdot 1,974 - (10,992 - 2 \cdot 0,477) \cdot (1,974 - 2 \cdot 0,477)] + 0,0381$$

$$\cdot [2 \cdot 5,224 + 2 \cdot 10,992 - 1,194 + 2 \cdot (10,992 - 1,194) + 2 \cdot (1,974 - 2 \cdot 0,477)] = 32,694 \text{ m}^2$$

Plocha doskového prehrievača SH3

$$S_{SH3} = n_d \cdot S_d = 15 \cdot 32,694 = 490,416 \text{ m}^2 \quad (7-2)$$

Geometria spalínového kanála

Šírka spalínového kanála: $A = 5527 \text{ mm} = 5,527 \text{ m}$
 Hĺbka spalínového kanála: $B = 9080 \text{ mm} = 9,08 \text{ m}$
 Výška spalínového kanála: $C = 10992 \text{ mm} = 10,992 \text{ m}$

Uzavretá plocha stien

$$S = 2 \cdot (A \cdot B + B \cdot C + B \cdot C) \quad (7-3)$$

$$S = 2 \cdot (5,527 \cdot 9,08 + 5,527 \cdot 10,992 + 9,08 \cdot 10,992) = 421,491 \text{ m}^2$$

7.2 Parametre pary a spalín

Parametre pary

Tab. 7-1 Parametre pary pre prehrievač SH3

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|---------|--------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------|
| teplota | t_p^{in} | 402,5 | °C | teplota | t_p^{out} | 499,75 | °C |
| tlak | p_p^{in} | 14,5 | MPa | tlak | p_p^{out} | 14,33 | MPa |
| merný objem | v_p^{in} | 0,01659 | m ³ /kg | merný objem | v_p^{out} | 0,02190 | m ³ /kg |

Parametre spalín

Tab. 7-2 Parametre spalín pre prehrievač SH3

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|------|----|------------------|--------------------|--------|----|
| teplota | t_s^{in} | 1249 | °C | teplota | t_s^{out} | 1017,7 | °C |

Středné hodnoty

Středná teplota pary

$$t_p = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{402,5 + 499,75}{2} = 451,125 \text{ °C} \quad (7-4)$$

Středný měrný objem pary

$$v_p = \frac{v_p^{\text{in}} + v_p^{\text{out}}}{2} = \frac{0,01659 + 0,02190}{2} = 0,01924 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (7-5)$$

Středná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{1249 + 1017,7}{2} = 1133,35 \text{ °C} \quad (7-6)$$

Světlý prierez spalín

$$F_s = A \cdot B - n_d \cdot D \cdot j = 5,527 \cdot 9,08 - 15 \cdot 0,0381 \cdot 5,224 = 47,2 \text{ m}^2 \quad (7-7)$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\text{min}} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{vv\text{min}}] \quad (7-8)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,27 - 1) \cdot 3,982] = 76,926 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{76,926 \cdot (273 + 1133,35)}{47,2 \cdot 273} = 8,396 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7-9)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_d \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot (65,278 - 5) \cdot 0,01924}{\pi \cdot 0,02684^2 \cdot 15 \cdot 10} = 13,669 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7-10)$$

7.3 Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

Tab. 7-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH3 [5]

| | | | |
|----------------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $208,155 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $12,731 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,5981 | $[-]$ |

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín pri priečnom obtekaní trubiek

pomerná priečna rozteč trubiek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,6}{0,0381} = 15,748 \quad (7-11)$$

pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,048}{0,0381} = 1,26 \quad (7-12)$$

korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} \quad (7-13)$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 15,748 - 3) \left(1 - \frac{1,26}{2}\right)^3\right]^2} = 0,167$$

$C_z = 1$ - korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku v pozdĺžnom smere [4]

$$\alpha_{ks}^{pr} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu_s}\right)^{0,65} \cdot \text{Pr}_s^{0,33} \quad (7-14)$$

$$\alpha_{ks}^{pr} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,167 \cdot \frac{12,731 \cdot 10^{-2}}{0,0381} \cdot \left(\frac{8,396 \cdot 0,0381}{208,155 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,65} \cdot 0,5981^{0,33}$$

$$\alpha_{ks}^{pr} = 11,124 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín pri pozdĺžnom obtekaní trubiek

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(A \cdot B - n_{tr} \cdot n_d \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)}{2 \cdot (A + B) + n_{tr} \cdot n_d \cdot \pi \cdot D} \quad (7-15)$$

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(5,527 \cdot 9,08 - 10 \cdot 15 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0381^2}{4}\right)}{2 \cdot (5,527 + 9,08) + 10 \cdot 15 \cdot \pi \cdot 0,0381} = 4,241 \text{ m}$$

$$\alpha_{ks}^{po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (7-16)$$

$$\alpha_{ks}^{po} = 0,023 \cdot \frac{12,731 \cdot 10^{-2}}{4,241} \cdot \left(\frac{8,396 \cdot 4,241}{208,155 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,5981^{0,4} = 8,636 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 7-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH3

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $77,449 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,711 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $5,217 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 1,115 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (7-17)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{77,449 \cdot 10^{-3}}{0,02684} \cdot \left(\frac{13,669 \cdot 0,02684}{5,217 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,115^{0,4} = 3300,151 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.5 Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy

$$s = \frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}} = \frac{1}{\frac{1}{10,992} + \frac{1}{5,224} + \frac{1}{0,6}} = 0,924 \quad (7-18)$$

a, b, c [m] - výška, šírka a hĺbka voľného priestoru medzi doskami

Objemová koncentrácia trojatómových plynov

$$\Gamma_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (7-19)$$

$$\Gamma_{H_2O} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,27 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,27 - 1) \cdot 3,982} = 0,186$$

$$\Gamma_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (7-20)$$

$$\Gamma_{RO_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,27 - 1) \cdot 3,982} = 0,118$$

$$r_S = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (7-21)$$

$$r_S = 0,186 + 0,118 = 0,304$$

Parciální tlak trojatómových plynů v spalínách

$$p_S = r_S \cdot p = 0,304 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (7-22)$$

p [MPa] - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sálania trojatómovými plynmi

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S \quad (7-23)$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,924}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1133,35 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,304 = 2,838$$

Hmotnosť spalín G_S

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{ok} \cdot O_{VVmin} \quad (7-24)$$

$$G_S = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,27 \cdot 3,982 = 7,526 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentrácia popola v spalínách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{\dot{u}} + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (7-25)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,526} = 0,00983$$

Súčiniteľ zoslabenia sálaním popolčkovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_s + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (7-26)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0093}{\sqrt[3]{(1133,35 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,701$$

d_{pk} [μm] - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (7-27)$$

$$k \cdot p \cdot s = (2,838 + 0,701) \cdot 0,101 \cdot 0,924 = 0,331$$

Stupeň černosti prúdu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,331} = 0,279 \quad (7-28)$$

Teplota povrchu nánosů na strane spalín

$$t_z = t_p + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH3}}{S_{SH3}} \cdot 10^3 \quad (7-29)$$

$$t_z = 451,125 + \left(0,0059 + \frac{1}{3300,151} \right) \cdot \frac{19288,888}{490,416} \cdot 10^3 = 695,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{ s\u00f4\u00e7inite\u0142' zanesenia [4]}$$

$$a_{st} = 0,8 \text{ [-]} \quad - \text{ stupe\u0144' \u010dernosti povrchu stien [4]}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}} \quad (7-30)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,279 \cdot (1133,35 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{695,1 + 273,15}{1133,35 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{695,1 + 273,15}{1133,35 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 99,078 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

7.6 S\u00f4\u00e7inite\u0142' prostupu tepla

$$\xi = 0,85 \text{ [-]} \quad - \text{ s\u00f4\u00e7inite\u0142' vyu\u017eit\u00e1 plochy [4]}$$

S\u00f4\u00e7inite\u0142' prestupu tepla na strane spal\u00edn pre prie\u010dn\u00e9 pr\u00fcdenie

$$\alpha_s^{pr} = \xi \cdot \left(\alpha_{ks}^{pr} \cdot \frac{D}{2 \cdot s_2 \cdot 0,95} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-31)$$

$$\alpha_s^{pr} = 0,85 \cdot \left(11,124 \cdot \frac{0,0381}{2 \cdot 0,048 \cdot 0,95} + 99,078 \right) = 96,626 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

S\u00f4\u00e7inite\u0142' prestupu tepla na strane spal\u00edn pre prie\u010dn\u00e9 pr\u00fcdenie

$$\alpha_s^{po} = \xi \cdot \left(\alpha_{ks}^{po} \cdot \frac{D}{2 \cdot s_2 \cdot 0,95} + \alpha_{sal} \right) \quad (7-32)$$

$$\alpha_s^{po} = 0,85 \cdot \left(8,636 \cdot \frac{0,0381}{2 \cdot 0,048 \cdot 0,95} + 99,078 \right) = 93,85 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Podiel tepla vysálaného z ohniska a odovzdaného do priestoru

$$m = \frac{Q_{ods}}{Q_{SH3}} = \frac{2226,419}{19288,889} = 0,115 \quad (7-33)$$

Súčiniteľ prostupu tepla pre priečne prúdenie

$$k^{pr} = \frac{\alpha_s^{pr}}{1 + \alpha_s^{pr} \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot (1 + m)} \quad (7-34)$$

$$k^{pr} = \frac{96,626}{1 + 96,626 \cdot \left(0,0059 + \frac{1}{3300,151}\right) \cdot (1 + 0,115)} = 57,91 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prostupu tepla pre pozdĺžne prúdenie

$$k^{po} = \frac{\alpha_s^{po}}{1 + \alpha_s^{po} \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot (1 + m)} \quad (7-35)$$

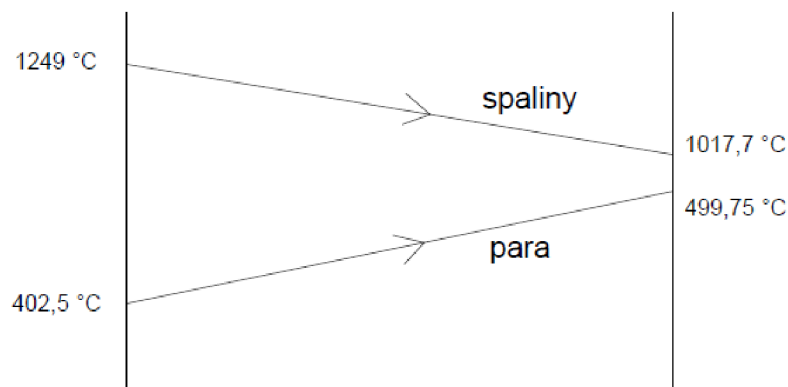
$$k^{po} = \frac{93,85}{1 + 93,85 \cdot \left(0,0059 + \frac{1}{3300,151}\right) \cdot (1 + 0,115)} = 56,901 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$k_{cel} = k^{pr} \cdot 0,7 + k^{po} \cdot 0,3 = 57,91 \cdot 0,7 + 56,901 \cdot 0,3 = 57,607 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7-36)$$

7.7 Tepelný výkon doskového prehrievača SH3**Teplotný spád**

Pomer väčšieho a menšieho rozdielu teplôt je menší ako 1,7 preto sa môže teplotný spád počítať ako rozdiel strednej teploty spalín a pary.

$$\Delta t = t_s - t_p = 1133,35 - 451,125 = 682,225 \text{ °C} \quad (7-37)$$



Obr. 7-2 Teplotný spád doskového prehrievača SH3

Tepelný výkon

$$Q_{SH3}^{skut} = k_{cel} \cdot \Delta t \cdot S_{SH3} = 57,607 \cdot 682,225 \cdot 490,416 = 19273,92 \text{ kW} \quad (7-38)$$

Kontrola

$$\Delta Q_{SH3} = \frac{Q_{SH3}^{skut} - Q_{SH3}}{Q_{SH3}} \cdot 100 = \frac{19273,92 - 19288,889}{19288,889} \cdot 100 = -0,078 \% \quad (7-39)$$

7.8 Výpočet paralelných plôch**7.8.1 Prvý úsek stropného prehrievača SH1****Návrh geometrie**

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 6,2 \text{ mm} = 0,0062 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 6,2 = 47,9 \text{ mm} = 0,0479 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 210 \text{ mm} = 0,21 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 40$ |

Povrch trubiek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 5,527 \cdot 40 = 41,881 \text{ m}^2 \quad (7-40)$$

Parametre pary a spalín

Tab. 7-5 Parametre spalín a pary pre prvý úsek stropného prehrievača SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|------------|--------|----|------------------|-------------|--------|----|
| teplota pary | t_p^{in} | 343,22 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 344,62 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 1249 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 1017,7 | °C |

Stredné hodnoty

Stredný merný objem pary

$$v_p^{in} = 0,0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p^{out} = 0,0117 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p = \frac{v_p^{in} + v_p^{out}}{2} = \frac{0,0101 + 0,0117}{2} = 0,0109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (7-41)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs1} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} \quad (7-42)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,0109}{\pi \cdot 0,04794^2 \cdot 40} = 8,359 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 7-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $109,0535 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,287 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $2,493 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 2,141 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (7-43)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{109,0535 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{8,359 \cdot 0,0479}{2,493 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,141^{0,4} = 6545,184 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (A + B)} = \frac{4 \cdot 47,2}{2 \cdot (5,527 + 9,08)} = 6,463 \text{ m} \quad (7-44)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (7-45)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{12,731 \cdot 10^{-2}}{6,463} \cdot \left(\frac{8,396 \cdot 6,463}{208,155 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,5981^{0,4} = 7,939 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže je prvý úsek stropného prehrievača SH1 paralelná plocha k doskovému prehrievaču SH3, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 99,078 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 0,9 \cdot (7,939 + 99,078) = 96,315 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (7-46)$$

ω [-] - súčiniteľ omývania plochy [4]

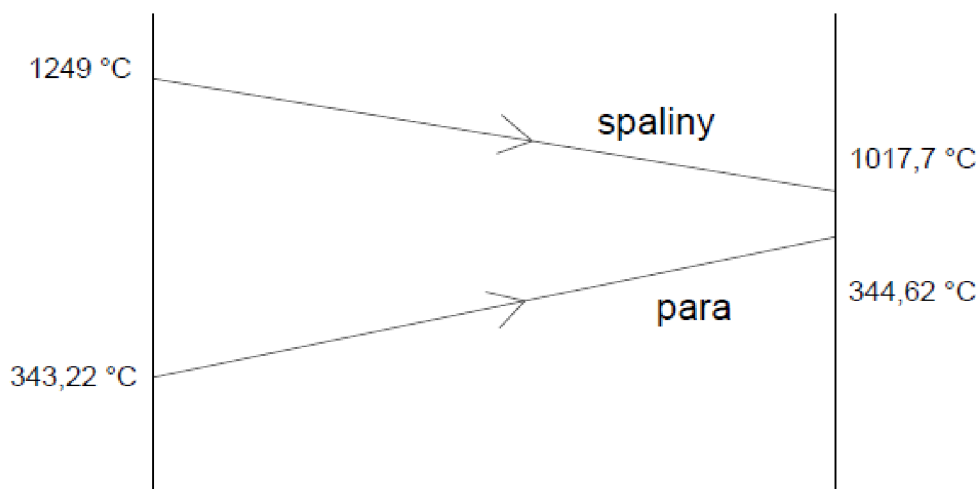
Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{\text{cel}} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} = \frac{96,315}{1 + \left(0,0035 + \frac{1}{6545,1849}\right) \cdot 96,315} = 71,248 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (7-47)$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{súčiniteľ zanesenia [4]}$$

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 7-3 Teplotný spád prvého úseku stropného prehrievača SH1

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_p^{\text{in}} = 1249 - 343,22 = 905,78 \text{ °C} \quad (7-48)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_p^{\text{out}} = 1017,7 - 344,62 = 673,08 \text{ °C} \quad (7-49)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{905,78 - 673,08}{\ln\left(\frac{905,78}{673,08}\right)} = 783,68 \text{ °C} \quad (7-50)$$

$$Q_{\text{SH1}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 71,248 \cdot 783,68 \cdot 41,881 = 2338,461 \text{ kW} \quad (7-51)$$

7.8.2 Trubky výparníka na stenách

Návrh geometrie

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 5 = 50,3 \text{ mm} = 0,0503 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 250$ |

Povrch trubiek

$$S = B \cdot C + 2 \cdot A \cdot C + B \cdot 1,013 \quad (7-52)$$

$$S = 9,08 \cdot 10,992 + 2 \cdot 5,527 \cdot 10,992 + 9,08 \cdot 1,013 = 230,511 \text{ m}^2$$

Parametre parovodnej zmesi a spalín

Tab. 7-7 Parametre spalín a parovodnej zmesi pre trubky výparníka na stenách

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|------------|--------|----|------------------|-------------|--------|----|
| teplota vody | t_p^{in} | 303,22 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 343,22 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 1249 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 1017,7 | °C |

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(A \cdot B - n_{tr} \cdot \frac{D^2}{4} \right)}{2 \cdot (A + B) + n_{tr} \cdot \pi \cdot D} \quad (7-53)$$

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(5,527 \cdot 9,08 - 250 \cdot \frac{60,3^2}{4} \right)}{2 \cdot (5,527 + 9,08) + 250 \cdot \pi \cdot 60,3} = 2,61 \text{ m}$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (7-54)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{12,731 \cdot 10^{-2}}{2,61} \cdot \left(\frac{8,396 \cdot 2,61}{208,155 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,5981^{0,4} = 9,517 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže sú trubky výparníka na stenách paralelná plocha k doskovému prehrievaču SH3, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 99,078 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 0,85 \cdot (9,517 + 99,078) = 92,306 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7-55)$$

$\omega [-]$ - súčiniteľ omývania plochy [4]

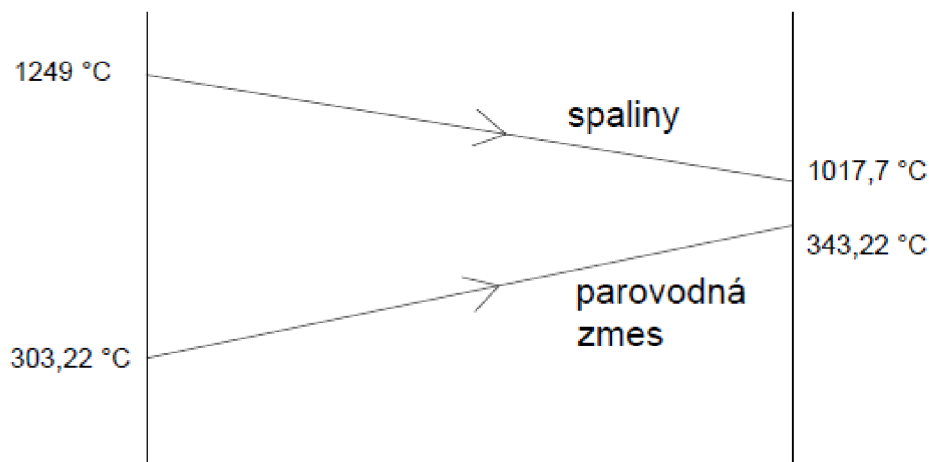
Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{cel} = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} = \frac{92,306}{1 + 0,0035 \cdot 92,306} = 57,824 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (7-56)$$

$\varepsilon \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$ - súčiniteľ zanesenia [4]

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 7-4 Teplotný spád trubiek výparníka na stenách

$$\Delta t_{in} = t_s^{in} - t_p^{in} = 1249 - 303,22 = 945,78 \text{ °C} \quad (7-57)$$

$$\Delta t_{out} = t_s^{out} - t_p^{out} = 1017,7 - 343,22 = 674,48 \text{ °C} \quad (7-58)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{in} - \Delta t_{out}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{in}}{\Delta t_{out}}\right)} = \frac{945,78 - 674,48}{\ln\left(\frac{945,78}{674,48}\right)} = 802,501 \text{ °C} \quad (7-59)$$

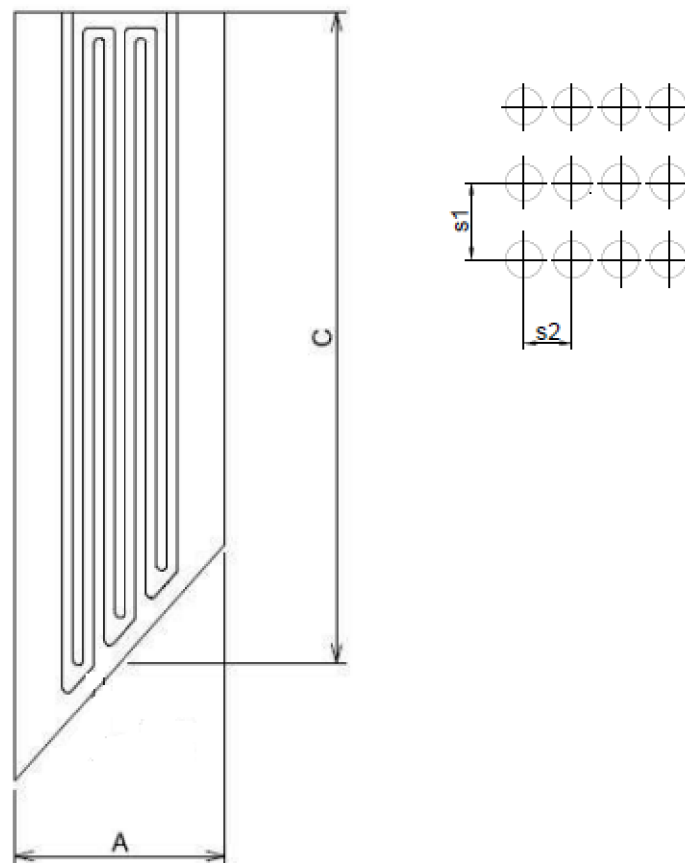
$$Q_{VYPI}^{skut} = k_{cel} \cdot \Delta t \cdot S = 57,824 \cdot 802,501 \cdot 230,511 = 10696,594 \text{ kW} \quad (7-60)$$

8 Výstupný prehrievač SH4

Prehrievač SH4 je tvorený trúbkami, ktoré vytvárajú dvojhady usporiadané vedľa seba. Prehrievač je v súpružom zapojení a sú k nemu priradené paralelné plochy – druhý úsek stropného prehrievača SH1, trubky výparníka na stenách.

8.1 Návrh geometrie

Geometria výstupného prehrievača SH4



Obr. 8-1 Geometria výstupného prehrievača SH4

| | |
|--------------------------|--|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 38,1 \text{ mm} = 0,0381 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5,63 \text{ mm} = 0,00563 \text{ m}$ |
| Vnútorňý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 38,1 - 2 \cdot 5,63 = 26,84 \text{ mm} = 0,02684 \text{ m}$ |
| Priečna rozteč: | $s_1 = 160 \text{ mm} = 0,16 \text{ m}$ |
| Pozdĺžna rozteč: | $s_2 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$ |
| Počet radov: | $n_r = 53$ |
| Počet trúbiek v rade: | $n_{tr} = 2$ |
| Dĺžka jedného hada: | $l = 51253 \text{ mm} = 51,253 \text{ m}$ |

Povrch trubky

$$S_{\text{trubky}} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot 0,0381 \cdot 51,253 = 6,135 \text{ m}^2 \quad (8-1)$$

Plocha prehrievača SH4

$$S = S_{\text{trubky}} \cdot n_r \cdot n_{tr} = 6,135 \cdot 53 \cdot 2 = 650,279 \text{ m}^2 \quad (8-2)$$

Geometria spalínového kanála

Šírka spalínového kanála: $A = 2753 \text{ mm} = 2,753 \text{ m}$

Hĺbka spalínového kanála: $B = 9080 \text{ mm} = 9,08 \text{ m}$

Stredná výška spalínového kanála: $C = 8286 \text{ mm} = 8,286 \text{ m}$

8.2 Parametre pary a spalín

Parametre pary

Tab. 8-1 Parametre pary pre prehrievač SH4

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|--------------------|------------------|--------------------|--------|--------------------|
| teplota | t_p^{in} | 439,3 | °C | teplota | t_p^{out} | 540 | °C |
| tlak | p_p^{in} | 14,33 | MPa | tlak | p_p^{out} | 14 | MPa |
| merný objem | v_p^{in} | 0,0190 | m ³ /kg | merný objem | v_p^{out} | 0,0243 | m ³ /kg |

Parametre spalín

Tab. 8-2 Parametre spalín pre prehrievač SH4

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|----|------------------|--------------------|-------|----|
| teplota | t_s^{in} | 1017,7 | °C | teplota | t_s^{out} | 804,3 | °C |

Stredné hodnoty

Stredná teplota pary

$$t_p = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{439,3 + 540}{2} = 489,515 \text{ °C} \quad (8-3)$$

Stredný merný objem pary

$$v_p = \frac{v_p^{\text{in}} + v_p^{\text{out}}}{2} = \frac{0,0190 + 0,0243}{2} = 0,02165 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (8-4)$$

Středná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{1017,7 + 804,3}{2} = 911^\circ\text{C} \quad (8-5)$$

Světlý prierez spalín

$$F_s = B \cdot C - n_r \cdot D \cdot C = 9,08 \cdot 8,286 - 53 \cdot 0,0381 \cdot 8,286 = 58,501 \text{ m}^2 \quad (8-6)$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\text{min}} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{vv\text{min}}] \quad (8-7)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982] = 77,452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{77,452 \cdot (273 + 911)}{58,501 \cdot 273} = 5,742 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8-8)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_r \cdot n_{tr}} = \frac{4 \cdot 65,278 \cdot 0,02165}{\pi \cdot 0,02684^2 \cdot 53 \cdot 2} = 23,565 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8-9)$$

8.3 Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

Tab. 8-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH4 [5]

| | | | |
|----------------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $158,307 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $10,710 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,619 | $[-]$ |

pomerná priečna rozteč trubiek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,16}{0,0381} = 4,119 \quad (8-10)$$

pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,0381} = 2,625 \quad (8-11)$$

korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} \quad (8-12)$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 4,119 - 3) \left(1 - \frac{2,625}{2}\right)^3\right]^2} = 1,433$$

$C_z = 1$ - korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku v pozdĺžnom smere [4]

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s}\right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (8-13)$$

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,433 \cdot \frac{10,710 \cdot 10^{-2}}{0,0381} \cdot \left(\frac{5,742 \cdot 0,0381}{158,307 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,65} \cdot 0,619^{0,33}$$

$$\alpha_{ks} = 75,541 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 8-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH4

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $79,428 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,876 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $6,227 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 1,046 | [-] |

$C_l = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v_p}\right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (8-14)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{79,428 \cdot 10^{-3}}{0,02684} \cdot \left(\frac{23,565 \cdot 0,02684}{6,227 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,115^{0,4} = 4428,160 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

8.5 Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right) \quad (8-15)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0381 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,1}{0,0381^2} - 1\right) = 0,447 \text{ m}$$

Objemová koncentracie trojatómových plynov

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}}{O_{\text{SVmin}} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}} \quad (8-16)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,28 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,185$$

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2}}{O_{\text{SVmin}} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}} \quad (8-17)$$

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,117$$

$$r_{\text{S}} = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2} \quad (8-18)$$

$$r_{\text{S}} = 0,185 + 0,117 = 0,302$$

Parciálny tlak trojatómových plynov v spalínách

$$p_{\text{S}} = r_{\text{S}} \cdot p = 0,302 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (8-19)$$

p [MPa] - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sálenia trojatómovými plynmi

$$k_{\text{S}} \cdot r_{\text{S}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{S}} \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{S}} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{\text{S}} \quad (8-20)$$

$$k_{\text{S}} \cdot r_{\text{S}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,185}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,447}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{911 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,302 = 4,834$$

Hmotnosť spalín G_{S}

$$G_{\text{S}} = 1 - A^{\text{r}} + 1,306 \cdot \alpha_1 \cdot O_{\text{VVmin}} \quad (8-21)$$

$$G_{\text{S}} = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,28 \cdot 3,982 = 7,578 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentracie popola v spalínách

$$\mu_{\text{pk}} = \frac{A^{\text{r}} \cdot (X_{\text{ú}} + 1)}{2 \cdot G_{\text{S}}} \quad (8-22)$$

$$\mu_{\text{pk}} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,578} = 0,0097$$

Súčiniteľ zoslabenia sálaním popolčkovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_s + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (8-23)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0097}{\sqrt[3]{(911 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,683$$

$d_{pk} [\mu m]$ - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (8-24)$$

$$k \cdot p \cdot s = (4,834 + 0,683) \cdot 0,101 \cdot 0,447 = 0,249$$

Stupeň černosti prúdu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,249} = 0,219 \quad (8-25)$$

Teplota povrchu nánosů na strane spalín

$$t_z = t_p + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH4}}{S_{SH4}} \cdot 10^3 \quad (8-26)$$

$$t_z = 489,515 + \left(0,0054 + \frac{1}{4428,160} \right) \cdot \frac{19583,333}{650,279} \cdot 10^3 = 658,938 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{ súčiniteľ zanesenia [4]}$$

$a_{st} = 0,8 [-]$ - stupeň černosti povrchu stien [4]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}} \quad (8-27)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,219 \cdot (911 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{658,938 + 273,15}{911 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{658,938 + 273,15}{911 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 53,881 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

8.6 Súčiniteľ prostupu tepla

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (75,541 + 53,881) = 129,422 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-28)$$

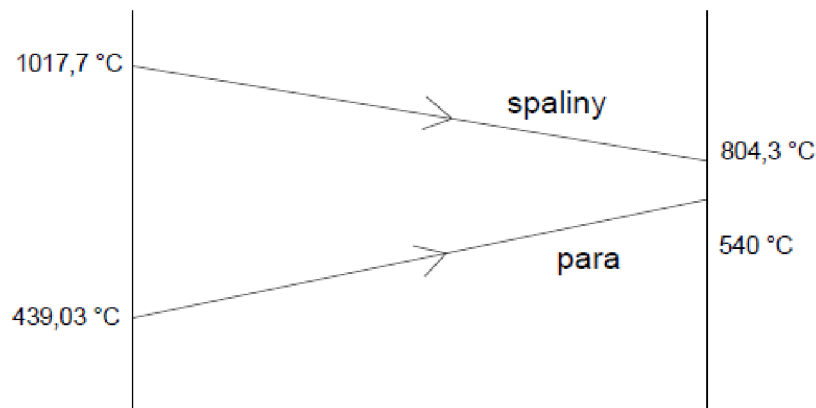
ω [-] - súčiniteľ omývania plochy [5]

$$k_{\text{cel}} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} = \frac{129,422}{1 + \left(0,0054 + \frac{1}{4428,160}\right) \cdot 129,422} = 74,892 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-29)$$

$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$ - súčiniteľ zanesenia [5]

8.7 Tepelný výkon výstupného prehrievača SH4

Teplotný spád



Obr. 8-2 Teplotný spád prehrievača SH4

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_p^{\text{in}} = 1017,7 - 439,03 = 578,67 \text{ °C} \quad (8-30)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_p^{\text{out}} = 804,3 - 540 = 264,3 \text{ °C} \quad (8-31)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{578,67 - 264,3}{\ln\left(\frac{578,67}{264,3}\right)} = 401,162 \text{ °C} \quad (8-32)$$

Tepelný výkon

$$Q_{SH4}^{skut} = k_{cel} \cdot \Delta t \cdot S = 74,892 \cdot 401,162 \cdot 650,279 = 19536,981 \text{ kW} \quad (8-33)$$

Kontrola

$$\Delta Q_{SH4} = \frac{Q_{SH4}^{skut} - Q_{SH4}}{Q_{SH4}} \cdot 100 = \frac{19536,981 - 19583,333}{19583,333} \cdot 100 = -0,237 \% \quad (8-34)$$

8.8 Výpočet paralelných plôch**8.8.1 Druhý úsek stropného prehrievača SH1****Návrh geometrie**

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 6,2 \text{ mm} = 0,0062 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 6,2 = 47,9 \text{ mm} = 0,0479 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 210 \text{ mm} = 0,21 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 40$ |

Povrch trubiek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 2,753 \cdot 40 = 20,861 \text{ m}^2 \quad (8-35)$$

Parametre pary a spalín

Tab. 8-5 Parametre spalín a pary pre druhý úsek stropného prehrievača SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|------------|--------|----|------------------|-------------|--------|----|
| teplota pary | t_p^{in} | 344,62 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 345,82 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 1017,7 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 804,3 | °C |

Stredné hodnoty

Stredný merný objem pary

$$v_p^{in} = 0,0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p^{out} = 0,0117 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p = \frac{v_p^{in} + v_p^{out}}{2} = \frac{0,0101 + 0,0117}{2} = 0,0109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (8-36)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs1} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} \quad (8-37)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,0109}{\pi \cdot 0,04794^2 \cdot 40} = 8,359 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 8-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $109,0535 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,287 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $2,493 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 2,141 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [5]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (8-38)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{109,0535 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{8,359 \cdot 0,0479}{2,493 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,141^{0,4} = 6545,184 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (B + C)} = \frac{4 \cdot 58,501}{2 \cdot (9,08 + 8,286)} = 6,738 \text{ m} \quad (8-39)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (8-40)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{10,710 \cdot 10^{-2}}{6,738} \cdot \left(\frac{5,742 \cdot 6,738}{158,307 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,619^{0,4} = 6,162 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže je druhý úsek stropného prehrievaču SH1 paralelná plocha k výstupnému prehrievaču SH4, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 53,881 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (6,162 + 53,881) = 60,043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-41)$$

$\omega [-]$ - súčiniteľ omývania plochy [4]

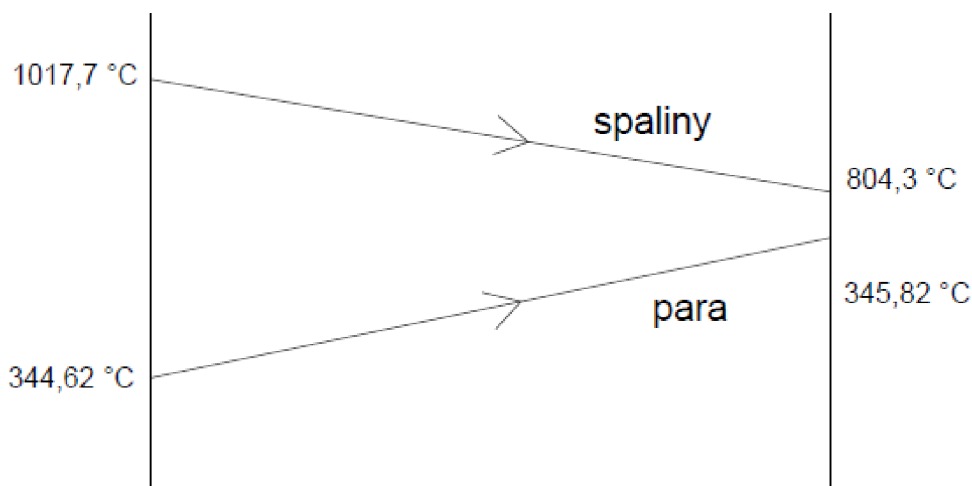
Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{\text{cel}} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} = \frac{60,043}{1 + \left(0,0105 + \frac{1}{6545,184}\right) \cdot 60,043} = 36,620 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-42)$$

$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$ - súčiniteľ zanesenia [4]

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 8-3 Teplotný spád druhého úseku stropného prehrievača SH1

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_p^{\text{in}} = 1017,7 - 344,62 = 673,08 \text{ °C} \quad (8-43)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_p^{\text{out}} = 804,3 - 345,82 = 458,48 \text{ °C} \quad (8-44)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{673,08 - 458,48}{\ln\left(\frac{673,08}{458,48}\right)} = 558,93 \text{ °C} \quad (8-45)$$

$$Q_{\text{SH1II}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 36,620 \cdot 558,93 \cdot 20,861 = 426,982 \text{ kW} \quad (8-46)$$

8.8.2 Trubky výparníka na stenách

Návrh geometrie

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 5 = 50,3 \text{ mm} = 0,0503 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 180$ |
| Dĺžka šikmého dna: | $l = 3703 \text{ mm} = 3,703 \text{ m}$ |
| Výška šikmého dna: | $h_d = 2477 \text{ mm} = 2,477 \text{ m}$ |
| Zadná výška: | $h_z = 7321 \text{ mm} = 7,321 \text{ m}$ |

Plocha trubiek výparníka na stenách

$$S = l \cdot B + 2 \cdot \left(A \cdot h_z + \frac{A \cdot h_d}{2} \right) \quad (8-47)$$

$$S = 3,703 \cdot 9,08 + 2 \cdot \left(2,753 \cdot 7,321 + \frac{2,753 \cdot 2,477}{2} \right) = 80,752 \text{ m}^2$$

Parametre parovodnej zmesi a spalín

Tab. 8-7 Parametre spalín a parovodnej zmesi pre trubky výparníka na stenách

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|----|------------------|--------------------|--------|----|
| teplota vody | t_p^{in} | 303,22 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 343,22 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 1017,7 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 804,3 | °C |

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (B + C)} = \frac{4 \cdot 58,501}{2 \cdot (9,08 + 8,286)} = 6,738 \text{ m} \quad (8-48)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (8-49)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{10,710 \cdot 10^{-2}}{6,738} \cdot \left(\frac{5,742 \cdot 6,738}{158,307 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,619^{0,4} = 6,162 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže sú trubky výparníka na stenách paralelná plocha k výstupnému prehrievaču SH4, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 53,881 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (6,162 + 53,881) = 60,043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-50)$$

ω [-] - súčiniteľ omývania plochy [4]

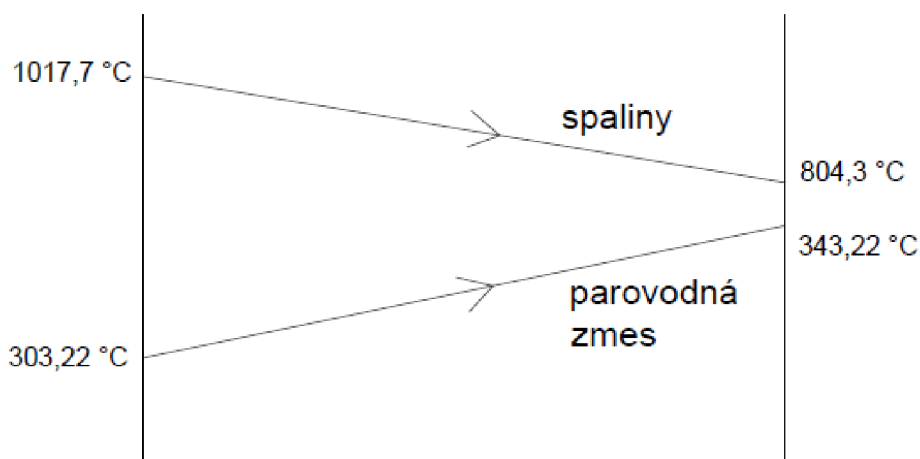
Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{cel} = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} = \frac{60,043}{1 + 0,006 \cdot 60,043} = 44,141 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (8-51)$$

$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$ - súčiniteľ zanesenia [4]

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 8-4 Teplotný spád trubiek výparníku na stenách

$$\Delta t_{in} = t_s^{in} - t_p^{in} = 1017,7 - 303,22 = 714,48 \text{ °C} \quad (8-52)$$

$$\Delta t_{out} = t_s^{out} - t_p^{out} = 804,3 - 343,22 = 461,08 \text{ °C} \quad (8-53)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{in} - \Delta t_{out}}{\ln \left(\frac{\Delta t_{in}}{\Delta t_{out}} \right)} = \frac{714,48 - 461,08}{\ln \left(\frac{714,48}{461,08} \right)} = 578,561 \text{ °C} \quad (8-54)$$

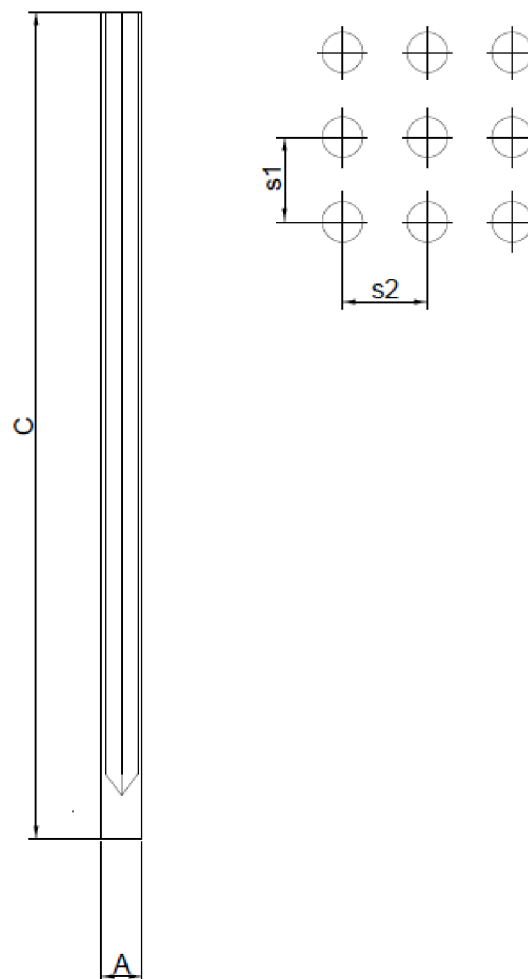
$$Q_{VYPH}^{skut} = k_{cel} \cdot \Delta t \cdot S = 44,141 \cdot 578,561 \cdot 80,752 = 2062,257 \text{ kW} \quad (8-55)$$

9 Mreža výparníka

Mreža výparníka je tvorená trubkami usporiadanými za sebou. Prevádza parovodnú zmes z membránovej steny cez spalínový kanál ku bubnu. Paralelná plocha k mreži výparníka je tretí úsek stropného prehrievača SH1.

9.1 Návrh geometrie

Geometria mreže výparníku



Obr. 9-1 Geometria mreže výparníka

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 5 = 50,3 \text{ mm} = 0,0503 \text{ m}$ |
| Priečna rozteč: | $s_1 = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$ |
| Pozdĺžna rozteč: | $s_2 = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$ |
| Počet radov: | $n_r = 60$ |
| Počet trubiiek v rade: | $n_{tr} = 3$ |
| Dĺžka jednej trubky: | $l = 7200 \text{ mm} = 7,200 \text{ m}$ |

Povrch trubky

$$S_{\text{trubky}} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot 0,0603 \cdot 7,200 = 1,364 \text{ m}^2 \quad (9-1)$$

Plocha mreže výparníku

$$S = S_{\text{trubky}} \cdot n_r \cdot n_{\text{tr}} = 1,364 \cdot 60 \cdot 3 = 245,512 \text{ m}^2 \quad (9-2)$$

Geometria spalínového kanála

Šírka spalínového kanála: $A = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$
 Hĺbka spalínového kanála: $B = 9080 \text{ mm} = 9,08 \text{ m}$
 Výška spalínového kanála: $C = 7321 \text{ mm} = 7,321 \text{ m}$

9.2 Parametre parovodnej zmesi a spalín

Parametre parovodnej zmesi

Tab. 9-1 Parametre parovodnej zmesi pre mrežu výparníka

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|-----|------------------|--------------------|--------|-----|
| teplota | t_p^{in} | 303,22 | °C | teplota | t_p^{out} | 343,22 | °C |
| tlak | p_p^{in} | 15,2 | MPa | tlak | p_p^{out} | 15,2 | MPa |

Parametre spalín

Tab. 9-2 Parametre spalín pre mrežu výparníka

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|-------|----|------------------|--------------------|-------|----|
| teplota | t_s^{in} | 804,3 | °C | teplota | t_s^{out} | 790,8 | °C |

Stredné hodnoty

Stredná teplota parovodnej zmesi

$$t_p = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{303,22 + 343,22}{2} = 323,22 \text{ °C} \quad (9-3)$$

Stredná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{804,3 + 790,8}{2} = 797,55 \text{ °C} \quad (9-4)$$

Svetlý prierez spalín

$$F_s = B \cdot C - n_r \cdot D \cdot l = 9,08 \cdot 7,321 - 60 \cdot 0,0603 \cdot 7,200 = 40,425 \text{ m}^2 \quad (9-5)$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{svmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{vvmin}] \quad (9-6)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982] = 77,452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{77,452 \cdot (273 + 797,55)}{40,425 \cdot 273} = 7,513 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (9-7)$$

9.3 Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

Tab. 9-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v mreži výparníka [5]

| | | | |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $134,757 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $9,691 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,632 | $[-]$ |

pomerná priečna rozteč trubiek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,15}{0,0603} = 2,488 \quad (9-8)$$

pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,0603} = 2,488 \quad (9-9)$$

korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} \quad (9-10)$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,488 - 3) \left(1 - \frac{2,488}{2}\right)^3\right]^2} = 1,06$$

korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku v pozdĺžnom smere [4]

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{tr} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (9-11)$$

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (9-12)$$

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 1,06 \cdot \frac{9,691 \cdot 10^{-2}}{0,0603} \cdot \left(\frac{7,513 \cdot 0,0603}{134,757 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,632^{0,33}$$

$$\alpha_{ks} = 52,88 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

9.4 Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (9-13)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,15 \cdot 0,15}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,373 \text{ m}$$

Objemová koncentrácia trojatómových plynov

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (9-14)$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,28 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,185$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (9-15)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,117$$

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (9-16)$$

$$r_s = 0,185 + 0,117 = 0,302$$

Parciálny tlak trojatómových plynov v spalinách

$$p_s = r_s \cdot p = 0,302 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (9-17)$$

p [MPa] - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sálania trojatómovými plynmi

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S \quad (9-18)$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,185}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,373}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{797,55 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,303 = 5,723$$

Hmotnosť spalín G_S

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_1 \cdot O_{VVmin} \quad (9-19)$$

$$G_S = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,28 \cdot 3,982 = 7,578 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentrácia popola v spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{\dot{u}} + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (9-20)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,578} = 0,0097$$

Súčiniteľ zoslabenia sálaním popolčekovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_s + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (9-21)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0097}{\sqrt[3]{(797,55 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,835$$

$d_{pk} [\mu m]$ - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (9-22)$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,723 + 0,835) \cdot 0,101 \cdot 0,373 = 0,244$$

Stupeň černosti prúdu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,244} = 0,217 \quad (9-23)$$

Teplota povrchu nánosu na strane spalín

$$t_z = t_p + \Delta t = 323,22 + 80 = 403,22 \text{ °C} \quad (9-24)$$

Δt [°C] - zvýšenie teploty [4]

$a_{st} = 0,8$ [-] - stupeň černosti povrchu stien [4]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}} \quad (9-25)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,219 \cdot (797,55 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{403,22 + 273,15}{797,55 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{403,22 + 273,15}{797,55 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 31,193 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

9.5 Súčiniteľ prostupu tepla**Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín**

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (52,880 + 31,193) = 84,073 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (9-26)$$

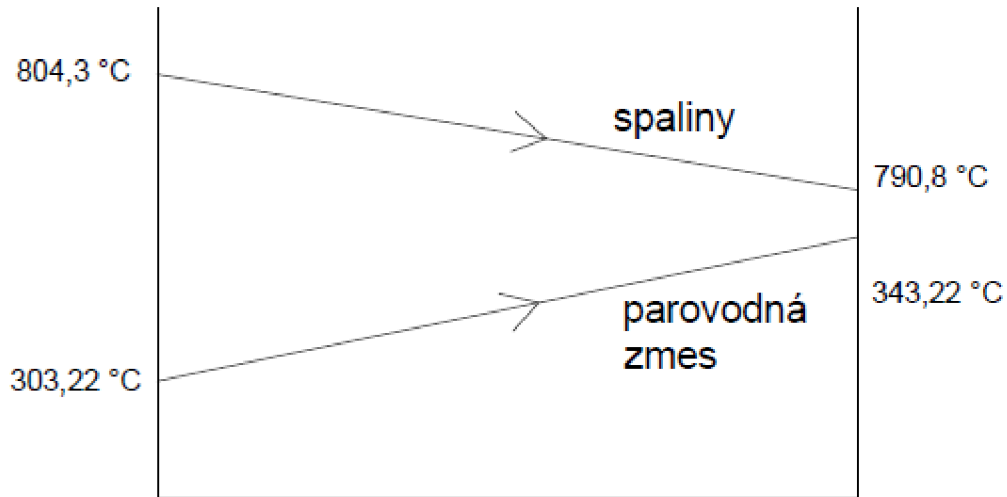
ω [-] - súčiniteľ omývania plochy [4]

$$k_{cel} = \psi \cdot \alpha_s = 0,65 \cdot 84,073 = 54,647 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (9-27)$$

ψ [-] - súčiniteľ tepelnej efektívnosti [4]

9.6 Tepelný výkon mreže výparníka

Teplotný spád



Obr. 9-2 Teplotný spád mreže výparníka

$$\Delta t_{in} = t_s^{in} - t_p^{in} = 804,3 - 303,22 = 501,08 \text{ °C} \quad (9-28)$$

$$\Delta t_{out} = t_s^{out} - t_p^{out} = 790,8 - 343,22 = 447,58 \text{ °C} \quad (9-29)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{in} - \Delta t_{out}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{in}}{\Delta t_{out}}\right)} = \frac{501,08 - 447,58}{\ln\left(\frac{501,08}{447,58}\right)} = 473,827 \text{ °C} \quad (9-30)$$

Tepelný výkon

$$Q_{mVYP}^{skut} = k_{cel} \cdot \Delta t \cdot S = 54,647 \cdot 473,827 \cdot 245,512 = 6357,139 \text{ kW} \quad (9-31)$$

Kontrola výkonu výparníka

$$Q_{VYP}^{skut} = Q_{pl} + Q_{VYPI}^{skut} + Q_{VYPII}^{skut} + Q_{mVYP}^{skut} \quad (9-32)$$

$$Q_{VYP}^{skut} = 50046,360 + 10696,594 + 2062,257 + 6357,139 = 69162,350 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_{VYP}^{skut} = \frac{Q_{VYP}^{skut} - Q_{VYP}}{Q_{VYP}} \cdot 100 = \frac{69162,350 - 69069,583}{69069,583} \cdot 100 = 0,134 \text{ %} \quad (9-33)$$

9.7 Výpočet paralelných plôch

9.7.1 Tretí úsek stropného prehrievača SH1

Návrh geometrie

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 6,2 \text{ mm} = 0,0062 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 6,2 = 47,9 \text{ mm} = 0,0479 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 210 \text{ mm} = 0,21 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 40$ |

Povrch trubiek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 0,3 \cdot 40 = 2,273 \text{ m}^2 \quad (9-34)$$

Parametre pary a spalín

Tab. 9-4 Parametre spalín a pary pre tretí úsek stropného prehrievača SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|------------|--------|----|------------------|-------------|--------|----|
| teplota pary | t_p^{in} | 345,82 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 346,08 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 804,3 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 790,8 | °C |

Stredné hodnoty

Stredný merný objem pary

$$v_p^{in} = 0,0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p^{out} = 0,0117 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p = \frac{v_p^{in} + v_p^{out}}{2} = \frac{0,0101 + 0,0117}{2} = 0,0109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (9-35)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs1} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} \quad (9-36)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,0109}{\pi \cdot 0,04794^2 \cdot 40} = 8,359 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 9-5 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $109,0535 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,287 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $2,493 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 2,141 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (9-37)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{109,0535 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{8,359 \cdot 0,0479}{2,493 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,141^{0,4} = 6545,184 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (B + C)} = \frac{4 \cdot 40,425}{2 \cdot (9,08 + 7,321)} = 4,930 \text{ m} \quad (9-38)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (9-39)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{9,691 \cdot 10^{-2}}{4,930} \cdot \left(\frac{7,513 \cdot 4,930}{134,757 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,632^{0,4} = 8,438 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže je tretí úsek stropného prehrievača SH1 paralelná plocha k mreži výparníka, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 31,193 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (8,438 + 31,193) = 39,631 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (9-40)$$

$\omega [-]$ - súčiniteľ omývania plochy [4]

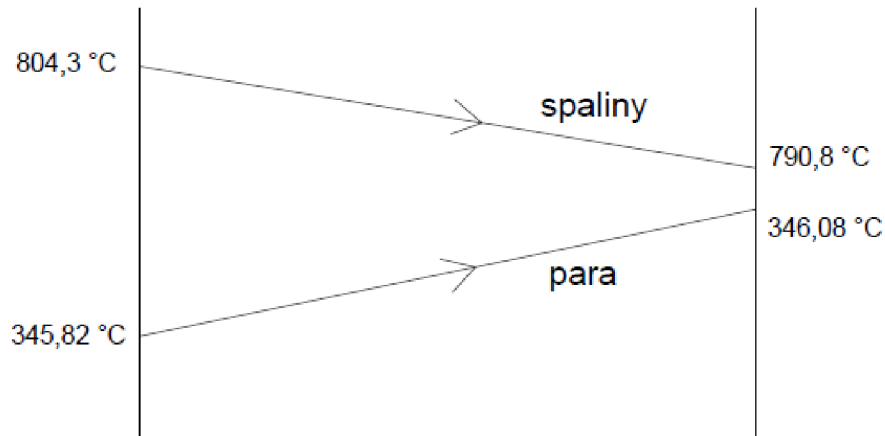
Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{cel} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_s} = \frac{39,631}{1 + \left(0,0065 + \frac{1}{6545,184} \right) \cdot 39,631} = 31,363 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (9-41)$$

$\varepsilon \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$ - súčiniteľ zanesenia [4]

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 9-3 Teplotný spád tretieho úseku stropného prehrievača SH1

$$\Delta t_{\text{in}} = t_{\text{s}}^{\text{in}} - t_{\text{p}}^{\text{in}} = 804,3 - 345,82 = 458,48 \text{ °C} \quad (9-42)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_{\text{s}}^{\text{out}} - t_{\text{p}}^{\text{out}} = 790,8 - 346,08 = 444,72 \text{ °C} \quad (9-43)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{458,48 - 444,72}{\ln\left(\frac{458,48}{444,72}\right)} = 451,56 \text{ °C} \quad (9-44)$$

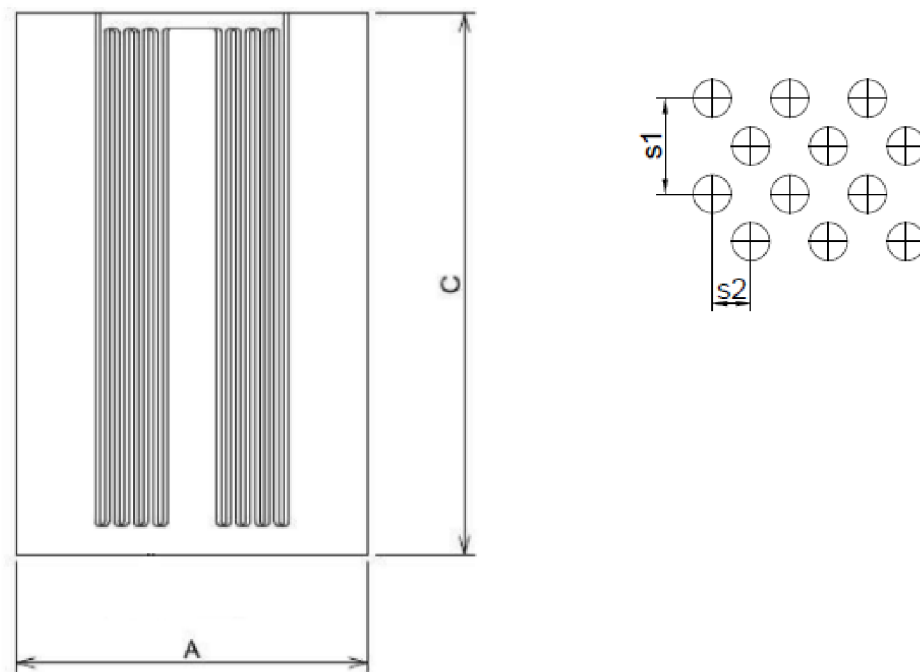
$$Q_{\text{SH1III}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 31,363 \cdot 451,56 \cdot 2,273 = 32,194 \text{ kW} \quad (9-45)$$

10 Prehrievač SH2

Prehrievač SH2 je tvorený dvoj-hadmi, ktorých trubky sú usporiadané striedavo a v protiprúdom zapojení. K prehrievaču SH2 patrí paralelná plocha štvrtý úsek stropného prehrievača SH1.

10.1 Návrh geometrie

Geometria prehrievača SH2



Obr. 10-1 Geometria prehrievača SH2

| | |
|--------------------------|--|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 31,8 \text{ mm} = 0,0318 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 5,63 \text{ mm} = 0,00563 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 31,8 - 2 \cdot 5,63 = 20,54 \text{ mm} = 0,02054 \text{ m}$ |
| Priečna rozteč: | $s_1 = 160 \text{ mm} = 0,16 \text{ m}$ |
| Pozdĺžna rozteč: | $s_2 = 65 \text{ mm} = 0,065 \text{ m}$ |
| Počet radov: | $n_r = 56$ |
| Počet trubiek v rade: | $n_{tr} = 2$ |
| Dĺžka jedného hada: | $l = 112605 \text{ mm} = 112,605 \text{ m}$ |
| Výška prehrievača: | $h = 6870 \text{ mm} = 6,870 \text{ m}$ |

Povrch trubky

$$S_{trubky} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot 0,0318 \cdot 112,605 = 11,25 \text{ m}^2 \quad (10-1)$$

Plocha prehríevača SH2

$$S = S_{\text{trubky}} \cdot n_r \cdot n_{tr} = 11,25 \cdot 56 \cdot 2 = 1259,948 \text{ m}^2 \quad (10-2)$$

Geometria spalínového kanála

Šírka spalínového kanála: $A = 5028 \text{ mm} = 5,028 \text{ m}$

Hĺbka spalínového kanála: $B = 9080 \text{ mm} = 9,08 \text{ m}$

Výška spalínového kanála: $C = 7321 \text{ mm} = 7,321 \text{ m}$

10.2 Parametre pary a spalín

Parametre pary

Tab. 10-1 Parametre pary pre prehríevač SH2

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|--------------------|------------------|--------------------|--------|--------------------|
| teplota | t_p^{in} | 348,78 | °C | teplota | t_p^{out} | 456,95 | °C |
| tlak | p_p^{in} | 14,9 | MPa | tlak | p_p^{out} | 14,5 | MPa |
| merný objem | v_p^{in} | 0,0117 | m ³ /kg | merný objem | v_p^{out} | 0,0196 | m ³ /kg |

Parametre spalín

Tab. 10-2 Parametre spalín pre prehríevač SH2

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|-------|----|------------------|--------------------|-------|----|
| teplota | t_s^{in} | 790,8 | °C | teplota | t_s^{out} | 593,9 | °C |

Stredné hodnoty

Stredná teplota pary

$$t_p = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{348,78 + 456,95}{2} = 402,865 \text{ °C} \quad (10-3)$$

Stredný merný objem pary

$$v_p = \frac{v_p^{\text{in}} + v_p^{\text{out}}}{2} = \frac{0,0117 + 0,0196}{2} = 0,01565 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (10-4)$$

Stredná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{790,8 + 593,9}{2} = 692,35 \text{ °C} \quad (10-5)$$

Svetlý prierez spalín

$$F_s = B \cdot C - n_r \cdot n_{tr} \cdot D \cdot h \quad (10-6)$$

$$F_s = 9,08 \cdot 7,321 - 56 \cdot 2 \cdot 0,0318 \cdot 6,870 = 42,006 \text{ m}^2$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{SVmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}] \quad (10-7)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982] = 77,452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{77,452 \cdot (273 + 692,35)}{42,006 \cdot 273} = 6,52 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10-8)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs1} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_r \cdot n_{tr}} \quad (10-9)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,01565}{\pi \cdot 0,02054^2 \cdot 56 \cdot 2} = 23,311 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

10.3 Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

Tab. 10-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH2 [5]

| | | | |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $112,589 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $8,685 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,641 | $[-]$ |

pomerná priečna rozteč trubiek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,16}{0,0318} = 5,031 \quad (10-10)$$

pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,0318} = 2,044 \quad (10-11)$$

pomerná uhlopriečna rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (10-12)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot 5,031^2 + 2,044^2} = 3,241$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{5,031 - 1}{3,241 - 1} = 1,799 \quad (10-13)$$

korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku

$$C_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,361 \quad (10-14)$$

korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku v pozdĺžnom smere [4]

$$C_z = 1$$

$$\alpha_{ks} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,6} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (10-15)$$

$$\alpha_{ks} = 1 \cdot 0,361 \cdot \frac{8,685 \cdot 10^{-2}}{0,0318} \cdot \left(\frac{6,52 \cdot 0,0318}{112,589 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,641^{0,33}$$

$$\alpha_{ks} = 77,389 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

10.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 10-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH2

| | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $78,614 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,505 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot \rho_p$ | $3,92 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 1,274 | [-] |

$C_l = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (10-16)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{78,614 \cdot 10^{-3}}{0,02054} \cdot \left(\frac{23,311 \cdot 0,02054}{3,92 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,274^{0,4} = 7179,707 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

10.5 Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (10-17)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,0605}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,346 \text{ m}$$

Objemová koncentrácia trojatómových plynov

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}}{O_{\text{SVmin}} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}} \quad (10-18)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,28 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,185$$

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2}}{O_{\text{SVmin}} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{\text{VVmin}}} \quad (10-19)$$

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,117$$

$$r_{\text{S}} = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2} \quad (10-20)$$

$$r_{\text{S}} = 0,185 + 0,117 = 0,302$$

Parciálny tlak trojatómových plynov v spalinách

$$p_{\text{S}} = r_{\text{S}} \cdot p = 0,302 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (10-21)$$

p [MPa] - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sálania trojatómovými plynmi

$$k_{\text{S}} \cdot r_{\text{S}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{S}} \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{S}} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{\text{S}} \quad (10-22)$$

$$k_{\text{S}} \cdot r_{\text{S}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,185}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,346}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{692,35 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,302 = 6,296$$

Hmotnost' spalín G_S

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_1 \cdot O_{VVmin} \quad (10-23)$$

$$G_S = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,28 \cdot 3,982 = 7,578 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentraci'a popola v spalínách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_u + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (10-24)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,578} = 0,0097$$

Súčiniteľ' zoslabenia sálaním popolčekovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_s + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (10-25)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0097}{\sqrt[3]{(911 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,683$$

$d_{pk} [\mu m]$ - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10-26)$$

$$k \cdot p \cdot s = (6,296 + 0,683) \cdot 0,101 \cdot 0,346 = 0,244$$

Stupeň černosti prúdu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,244} = 0,216 \quad (10-27)$$

Teplota povrchu nánosu na strane spalín

$$t_z = t_p + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{SH2}}{S} \cdot 10^3 \quad (10-28)$$

$$t_z = 402,865 + \left(0,0035 + \frac{1}{7179,707} \right) \cdot \frac{27638,889}{1259,948} \cdot 10^3 = 483,358 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$ - súčiniteľ' zanesenia [4]

$a_{st} = 0,8 [-]$ - stupeň černosti povrchu stien [4]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}} \quad (10-29)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,216 \cdot (692,35 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{483,358 + 273,15}{692,35 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{483,358 + 273,15}{692,35 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 28,511 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

10.6 Súčiniteľ prostupu tepla

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (77,389 + 28,511) = 105,900 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10-30)$$

$\omega [-]$ - súčiniteľ omývania plochy [4]

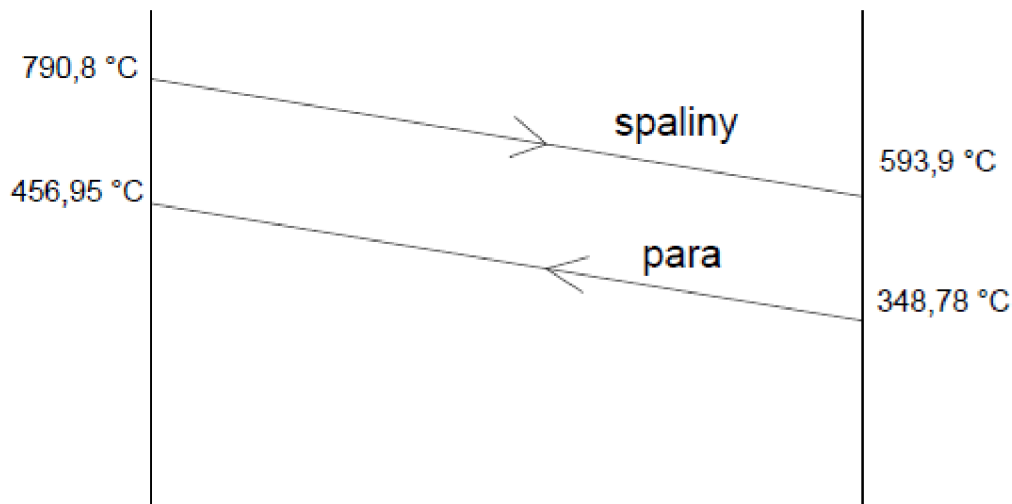
$$k_{cel} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} \quad (10-31)$$

$$k_{cel} = \frac{105,900}{1 + \left(0,0035 + \frac{1}{7179,707}\right) \cdot 105,900} = 76,441 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$\varepsilon \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$ - súčiniteľ zanesenia [4]

10.7 Tepelný výkon prehrievača SH2

Teplotný spád



Obr. 10-2 Teplotný spád prehrievača SH2

$$\Delta t_{\text{in}} = t_{\text{s}}^{\text{in}} - t_{\text{p}}^{\text{in}} = 790,8 - 456,95 = 333,85 \text{ °C} \quad (10-32)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_{\text{s}}^{\text{out}} - t_{\text{p}}^{\text{out}} = 593,9 - 348,78 = 245,12 \text{ °C} \quad (10-33)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{333,85 - 245,12}{\ln\left(\frac{333,85}{245,12}\right)} = 287,204 \text{ °C} \quad (10-34)$$

Tepelný výkon

$$Q_{\text{SH2}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 76,441 \cdot 287,204 \cdot 1259,948 = 27660,793 \text{ kW} \quad (10-35)$$

Kontrola

$$\Delta Q_{\text{SH2}} = \frac{Q_{\text{SH2}}^{\text{skut}} - Q_{\text{SH2}}}{Q_{\text{SH2}}} \cdot 100 = \frac{27660,793 - 27638,889}{27638,889} \cdot 100 = 0,079\% \quad (10-36)$$

10.8 Výpočet paralelných plôch

10.8.1 Štvrtý úsek stropného prehrievača SH1

Návrh geometrie

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 6,2 \text{ mm} = 0,0062 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 6,2 = 47,9 \text{ mm} = 0,0479 \text{ m}$ |
| Rozteč trubiek: | $s_1 = 210 \text{ mm} = 0,21 \text{ m}$ |
| Počet trubiek: | $n_{tr} = 40$ |

Povrch trubiek

$$S = \pi \cdot D \cdot A \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 5,028 \cdot 40 = 38,100 \text{ m}^2 \quad (10-37)$$

Parametre pary a spalín

Tab. 10-5 Parametre spalín a pary pre štvrtý úsek stropného prehrievača SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|----|------------------|--------------------|--------|----|
| teplota pary | t_p^{in} | 346,08 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 347,28 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 790,8 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 593,9 | °C |

Stredné hodnoty

Stredný merný objem pary

$$v_p^{\text{in}} = 0,0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p^{\text{out}} = 0,0117 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p = \frac{v_p^{\text{in}} + v_p^{\text{out}}}{2} = \frac{0,0101 + 0,0117}{2} = 0,0109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (10-38)$$

Rýchlosť prúdenia pary

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_{vs1} - M_{vs2}) \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} \quad (10-39)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,0109}{\pi \cdot 0,04794^2 \cdot 40} = 8,359 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 10-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1

| | | | |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $109.0535 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,287 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot \nu_p$ | $2,493 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 2,141 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (10-40)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{109.0535 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{8,359 \cdot 0,0479}{2,493 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,141^{0,4} = 6545,184 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

ekvivalentný priemer

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{2 \cdot (B + C)} = \frac{4 \cdot 42,006}{2 \cdot (9,08 + 7,321)} = 5,122 \text{ m} \quad (10-41)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr_s^{0,4} \quad (10-42)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{8,685 \cdot 10^{-2}}{5,122} \cdot \left(\frac{6,52 \cdot 5,122}{112,589 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,641^{0,4} = 7,790 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Keďže je štvrtý úsek stropného prehrievača SH1 paralelná plocha k prehrievaču SH2, súčiniteľ prestupu tepla sálaním má rovnakú hodnotu.

$$\alpha_{sal} = 28,511 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (7,790 + 28,511) = 36,301 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (10-43)$$

ω [-] - súčiniteľ omývania plochy [4]

Súčiniteľ prostupu tepla

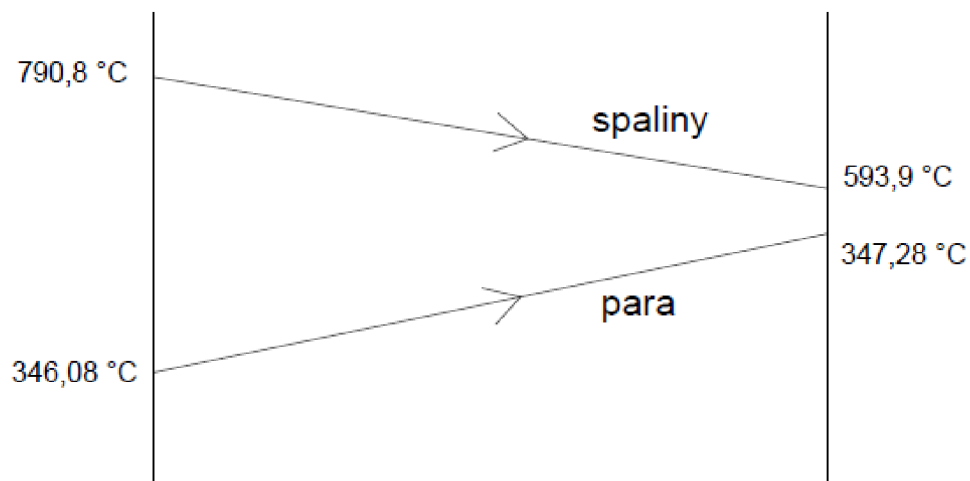
$$k_{\text{cel}} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} \quad (10-44)$$

$$k_{\text{cel}} = \frac{36,301}{1 + \left(0,0065 + \frac{1}{6545,184}\right) \cdot 36,301} = 29,240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{súčiniteľ zanesenia [4]}$$

Tepelný výkon

teplotný spád



Obr. 10-3 Teplotný spád štvrtého úseku stropného prehrievača SH1

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_p^{\text{in}} = 790,8 - 346,08 = 444,72 \text{ °C} \quad (10-45)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_p^{\text{out}} = 593,9 - 347,28 = 246,62 \text{ °C} \quad (10-46)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{444,72 - 246,62}{\ln\left(\frac{444,72}{246,62}\right)} = 335,993 \text{ °C} \quad (10-47)$$

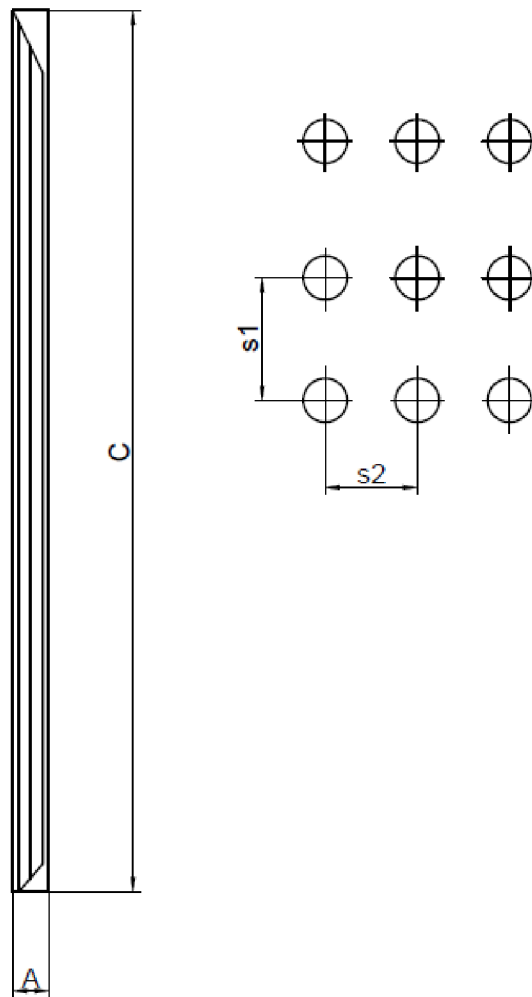
$$Q_{\text{SH1IV}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 29,240 \cdot 335,993 \cdot 38,100 = 374,302 \text{ kW} \quad (10-48)$$

11 Mreža stropného prehrievača SH1

Mreža stropného prehrievača je tvorená trubkami usporiadanými za sebou. Tieto trubky prevádzajú paru zo stropnej časti prehrievača SH1 cez spalinový kanál do zbernej komory, z kadiaľ následne para smeruje do prehrievača SH2.

11.1 Návrh geometrie

Geometria mreže stropného prehrievača SH1



Obr. 11-1 Geometria mreže stropného prehrievača SH1

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 60,3 \text{ mm} = 0,0603 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 6,2 \text{ mm} = 0,0062 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 60,3 - 2 \cdot 6,2 = 47,9 \text{ mm} = 0,0479 \text{ m}$ |
| Priečna rozteč: | $s_1 = 210 \text{ mm} = 0,21 \text{ m}$ |
| Pozdĺžna rozteč: | $s_2 = 125 \text{ mm} = 0,125 \text{ m}$ |
| Počet radov: | $n_r = 40$ |
| Počet trubiek v rade: | $n_{tr} = 3$ |
| Dĺžka trubiek: | $l = 6870 \text{ mm} = 6,870 \text{ m}$ |

Plocha mreže stropného prehrievača SH1

$$S = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_r \cdot n_{tr} \quad (11-1)$$

$$S = \pi \cdot 0,0603 \cdot 6,870 \cdot 40 \cdot 3 = 156,173 \text{ m}^2$$

Geometria spalínového kanála

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Šírka spalínového kanála: | A = 300 mm = 0,3 m |
| Hĺbka spalínového kanála: | B = 9080 mm = 9,08 m |
| Výška spalínového kanála: | C = 7321 mm = 7,321 m |

11.2 Parametre pary a spalín

Tab. 11-1 Parametre spalín a pary pre mrežu stropného prehrievača SH1

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|--------|----|------------------|--------------------|--------|----|
| teplota pary | t_p^{in} | 347,28 | °C | teplota pary | t_p^{out} | 348,78 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 593,9 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 581,3 | °C |

Stredné hodnoty

Stredný merný objem pary

$$v_p^{\text{in}} = 0,0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p^{\text{out}} = 0,0117 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_p = \frac{v_p^{\text{in}} + v_p^{\text{out}}}{2} = \frac{0,0101 + 0,0117}{2} = 0,0109 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (11-2)$$

Stredná teplota pary

$$t_p = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{347,28 + 348,78}{2} = 348,03 \text{ °C} \quad (11-3)$$

Stredná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{593,9 + 581,3}{2} = 587,6 \text{ °C} \quad (11-4)$$

Svetlý prierez spalín

$$F_s = B \cdot C - n_r \cdot D \cdot l \quad (11-5)$$

$$F_s = 9,08 \cdot 7,321 - 40 \cdot 0,0603 \cdot 6,870 = 49,904 \text{ m}^2$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{svmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{vvmin}] \quad (11-6)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982] = 77,452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{77,452 \cdot (273 + 587,6)}{49,904 \cdot 273} = 4,893 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (11-7)$$

11.3 Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín

Tab. 11-2 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v mreži strop. prehrievača SH1 [5]

| | | | |
|----------------------------------|-------------|------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $94,423 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $7,713 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,651 | $[-]$ |

pomerná priečna rozteč trubiek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,2}{0,0603} = 3,483 \quad (11-8)$$

pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,125}{0,0603} = 2,073 \quad (11-9)$$

korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2} \quad (11-10)$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 3,483 - 3) \left(1 - \frac{2,073}{2}\right)^3\right]^2} = 1$$

korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku v pozdĺžnom smere

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{tr} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (11-11)$$

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr_s^{0,33} \quad (11-12)$$

$$\alpha_{ks} = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 1 \cdot \frac{7,713 \cdot 10^{-2}}{0,0603} \cdot \left(\frac{4,893 \cdot 0,0603}{94,423 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,651^{0,33}$$

$$\alpha_{ks} = 38,302 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

11.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane pary

Tab. 11-3 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_p | $109,0535 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_p | $2,287 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_p = \eta_p \cdot v_p$ | $2,493 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_p | 2,141 | [-] |

$C_1 = 1$ - korekčný súčiniteľ [4]

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (11-13)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{109,0535 \cdot 10^{-3}}{0,0479} \cdot \left(\frac{8,359 \cdot 0,0479}{2,493 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 2,141^{0,4} = 6545,184 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

11.5 Súčiniteľ prestupu tepla sálaním

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (11-14)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,21 \cdot 0,125}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,445 \text{ m}$$

Objemová koncentrácia trojatómových plynov

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (11-15)$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,041 + (1,041 - 1) \cdot (1,28 - 1) \cdot 3,982}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,185$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (11-16)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,686 + 0,0007511}{4,751 + (1,28 - 1) \cdot 3,982} = 0,117$$

$$r_S = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (11-17)$$

$$r_S = 0,185 + 0,117 = 0,302$$

Parciální tlak trojatómových plynů v spalinách

$$p_S = r_S \cdot p = 0,302 \cdot 0,101 = 0,03 \text{ MPa} \quad (11-18)$$

p [MPa] - tlak za normálnych podmienok

Súčiniteľ zoslabenia sálania trojatómovými plynmi

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S \quad (11-19)$$

$$k_S \cdot r_S = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,185}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,445}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{587,6 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,302 = 5,861$$

Hmotnosť spalín G_S

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_1 \cdot O_{VVmin} \quad (11-20)$$

$$G_S = 1 - 0,0789 + 1,306 \cdot 1,28 \cdot 3,982 = 7,578 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Koncentrácia popola v spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_u + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (11-21)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0789 \cdot (0,87 + 1)}{2 \cdot 7,578} = 0,0097$$

Súčiniteľ zoslabenia sálaním popolčekovými časticami

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_s + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (11-22)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0097}{\sqrt[3]{(587,6 + 273,15)^2 \cdot 0,000016^2}} = 0,966$$

d_{pk} [μm] - stredný efektívny priemer častíc popolčeku [4]

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (11-23)$$

$$k \cdot p \cdot s = (5,861 + 0,966) \cdot 0,101 \cdot 0,445 = 0,307$$

Stupeň černosti prúdu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,307} = 0,264 \quad (11-24)$$

Teplota povrchu nánosů na strane spalín

$$t_z = t_p + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q}{S} \cdot 10^3 \quad (11-25)$$

$$t_z = 348,03 + \left(0,01 + \frac{1}{6545,184} \right) \cdot 10 \cdot 10^3 = 449,558 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{ súčiniteľ zanesenia [4]}$$

$$\frac{Q}{S} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad - \text{ tepelné zaťaženie pre stropné prehrievače [4]}$$

$$a_{st} = 0,8 [-] \quad - \text{ stupeň černosti povrchu stien [4]}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15}} \quad (11-26)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,216 \cdot (587,6 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{449,558 + 273,15}{587,6 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{449,558 + 273,15}{587,6 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 25,746 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

11.6 Súčiniteľ prostupu tepla**Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín**

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_{ks} + \alpha_{sal}) = 1 \cdot (38,302 + 25,746) = 64,048 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (11-27)$$

$$\omega [-] \quad - \text{ súčiniteľ omývania plochy [4]}$$

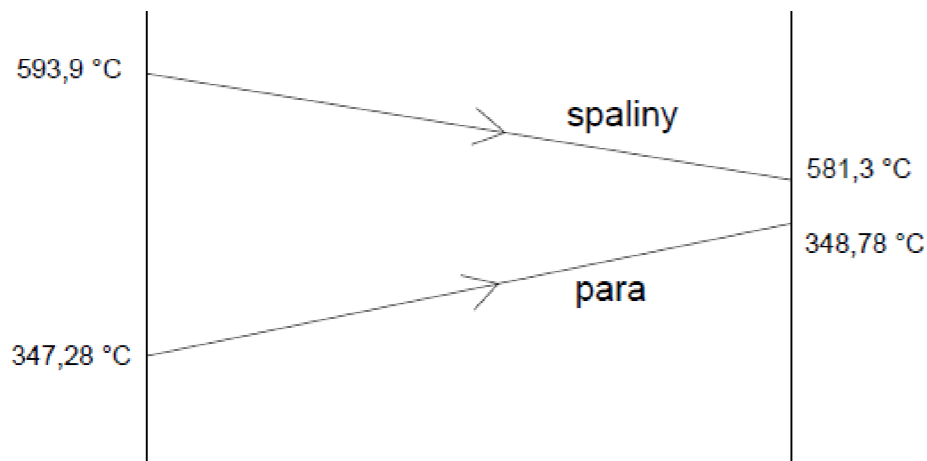
$$k_{\text{cel}} = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_s} \quad (11-28)$$

$$k_{\text{cel}} = \frac{64,048}{1 + \left(0,01 + \frac{1}{6545,184}\right) \cdot 64,048} = 38,881 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\varepsilon \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad - \text{ súčiniteľ zanesenia [4]}$$

11.7 Tepelný výkon mreže prehrievača SH1

Teplotný spád



Obr. 11-2 Teplotný spád mreže prehrievača SH1

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_p^{\text{in}} = 593,9 - 347,28 = 246,62 \text{ °C} \quad (11-29)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_p^{\text{out}} = 581,3 - 348,78 = 232,52 \text{ °C} \quad (11-30)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{246,62 - 232,52}{\ln\left(\frac{246,62}{232,52}\right)} = 239,501 \text{ °C} \quad (11-31)$$

Tepelný výkon

$$Q_{\text{SH1m}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 38,881 \cdot 239,501 \cdot 156,173 = 1454,289 \text{ kW} \quad (11-32)$$

Kontrola výkonu stropného prehrievača SH1

$$Q_{SH1}^{skut} = Q_{SH1I}^{skut} + Q_{SH1II}^{skut} + Q_{SH1III}^{skut} + Q_{SH1IV}^{skut} + Q_{SH1m}^{skut} \quad (11-33)$$

$$Q_{SH1}^{skut} = 2338,461 + 426,982 + 32,194 + 374,302 + 1454,289$$

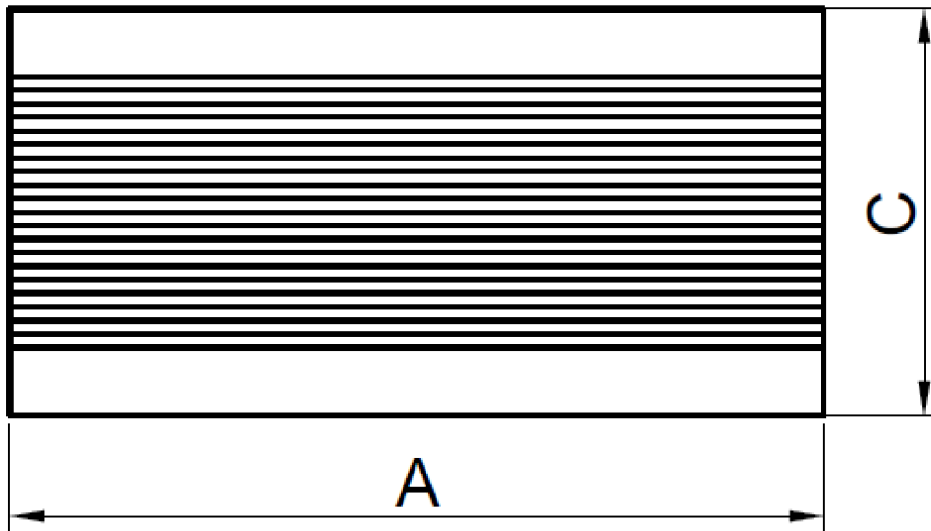
$$Q_{SH1}^{skut} = 4626,228 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_{SH1} = \frac{Q_{SH1}^{skut} - Q_{SH1}}{Q_{SH1}} \cdot 100 = \frac{4626,228 - 4629,294}{4629,294} \cdot 100 = -0,066\% \quad (11-34)$$

12 Ekonomizér

Ekonomizér tvoria rebrované trubky usporiadané za sebou, ktoré sú v protiprúdovom zapojení. Funkciou ekonomizéra je ohriatie napájacej vody na určenú teplotu 303,22 °C a jej prívod do bubna.

12.1 Návrh geometrie



Obr. 12-1 Geometria ekonomizéru

Geometria trubiek

| | |
|--------------------------|---|
| Vonkajší priemer trubky: | $D = 38,1 \text{ mm} = 0,0381 \text{ m}$ |
| Hrúbka steny: | $s = 4,26 \text{ mm} = 0,00426 \text{ m}$ |
| Vnútorý priemer trubky: | $d = D - 2 \cdot s = 38,1 - 2 \cdot 4,26 = 47,9 \text{ mm} = 0,02958 \text{ m}$ |
| Priečna rozteč: | $s_1 = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$ |
| Pozdĺžna rozteč: | $s_2 = 75 \text{ mm} = 0,075 \text{ m}$ |
| Počet radov v hadovi: | $n_r = 28$ |
| Počet hadov: | $n_{tr} = 88$ |
| Dĺžka jedného hada: | $l = n_r \cdot A = 28 \cdot 6 = 168 \text{ m}$ |

Geometria rebier

| | |
|----------------|--|
| Výška rebra: | $h_z = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$ |
| Priemer rebra: | $D_z = D + 2 \cdot h_z = 38,1 + 2 \cdot 10 = 58,1 \text{ mm} = 0,0581 \text{ m}$ |
| Hrúbka rebra: | $t_z = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$ |
| Počet rebier: | $n_z = 80 \text{ m}^{-1}$ |
| Rozteč rebier: | $s_z = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$ |

Geometria spalínového kanála

| | |
|---------------------------|--|
| Šírka spalínového kanála: | $A = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$ |
| Hĺbka spalínového kanála: | $B = 9080 \text{ mm} = 9,08 \text{ m}$ |
| Výška spalínového kanála: | $C = 3000 \text{ mm} = 3 \text{ m}$ |

Plocha jednoho rebra

$$S_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot (D_z^2 - D^2)}{4} + \pi \cdot D_z \cdot t_z \quad (12-1)$$

$$S_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot (0,0581^2 - 0,0381^2)}{4} + \pi \cdot 0,0581 \cdot 0,001 = 0,003205 \text{ m}^2$$

Povrch ekonomizéra na strane spalín

$$S_S = [\pi \cdot D \cdot (1 - t_z \cdot n_z^{-1}) + n_z^{-1} \cdot S_z] \cdot l \cdot n_{tr} \quad (12-2)$$

$$S_S = [\pi \cdot 0,0381 \cdot (1 - 0,001 \cdot 80^{-1}) + 80^{-1} \cdot 0,003205] \cdot 168 \cdot 88 = 5418,309 \text{ m}^2$$

Povrch ekonomizéra na strane vody

$$S_V = \pi \cdot d \cdot l \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,02958 \cdot 168 \cdot 88 = 1373,852 \text{ m}^2 \quad (12-3)$$

12.2 Parametre vody a spalín

Parametre pary

Tab. 12-1 Parametre vody pre ekonomizér

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|---------|--------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------|
| teplota | t_v^{in} | 210 | °C | teplota | t_v^{out} | 303,22 | °C |
| tlak | p_v^{in} | 15,5 | MPa | tlak | p_v^{out} | 15,2 | MPa |
| merný objem | v_v^{in} | 0,00116 | m ³ /kg | merný objem | v_v^{out} | 0,00139 | m ³ /kg |

Parametre spalín

Tab. 12-2 Parametre spalín pre ekonomizér

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|-------------------|-------|----|------------------|--------------------|-------|----|
| teplota | t_s^{in} | 581,3 | °C | teplota | t_s^{out} | 370,1 | °C |

Stredné hodnoty

Stredná teplota vody

$$t_v = \frac{t_v^{\text{in}} + t_v^{\text{out}}}{2} = \frac{210 + 303,22}{2} = 256,6 \text{ °C} \quad (12-4)$$

Stredný merný objem vody

$$v_v = \frac{v_v^{\text{in}} + v_v^{\text{out}}}{2} = \frac{0,00116 + 0,00139}{2} = 0,00128 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (12-5)$$

Stredná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{\text{in}} + t_s^{\text{out}}}{2} = \frac{581,3 + 370,1}{2} = 475,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12-6)$$

Svetlý prierez spalín

$$F_s = A \cdot B - n_{\text{tr}} \cdot [D \cdot A + (D_z - D) \cdot t_z \cdot n_z \cdot A] \quad (12-7)$$

$$F_s = 6 \cdot 9,08 - 88 \cdot [0,0381 \cdot 6 + (0,0581 - 0,0381) \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 6] = 33,518 \text{ m}^2$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{\text{pv}} \cdot [O_{\text{svmin}} + (\alpha_2 - 1) \cdot O_{\text{vmin}}] \quad (12-8)$$

$$V_s = 13,205 \cdot [4,751 + (1,32 - 1) \cdot 3,982] = 79,555 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s \cdot (273 + t_s)}{F_s \cdot 273} = \frac{79,555 \cdot (273 + 475,7)}{33,518 \cdot 273} = 6,509 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (12-9)$$

Rýchlosť prúdenia vody

$$w_v = \frac{4 \cdot (M_{\text{pp}} - M_{\text{vs1}} - M_{\text{vs2}}) \cdot v_v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{tr}}} \quad (12-10)$$

$$w_v = \frac{4 \cdot (65,278 - 5 - 5) \cdot 0,00128}{\pi \cdot 0,02958^2 \cdot 88} = 1,165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

12.3 Redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vonkajšej strany

Tab. 12-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v ekonomizéri [5]

| | | | |
|----------------------------------|-------------|------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $73,801 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $6,704 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |

Podiel výhrevných plôch rebier a celkovej plochy zo strany spalín

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{d} - \frac{t_z}{d}\right)} \quad (12-11)$$

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{0,0381}{0,02958}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,0381}{0,02958}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,02958} - \frac{1}{0,02958}\right)} = 0,459$$

Podiel voľných častí trubky. kde nie sú rebrá a celkovej plochy na strane spalín

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_{\check{z}}}{S} = 1 - 0,459 = 0,541 \quad (12-12)$$

Pomerná pozdĺžna rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{d} = \frac{0,075}{0,02958} = 2,535 \quad (12-13)$$

$C_s = 1 [-]$ - opravný koeficient pre usporiadanie trubiiek vo zväzku [4]
 $C_z = 1 [-]$ - opravný koeficient pre počet priečnych radov vo zväzku [4]

Súčiniteľ prestupu tepla pre rebrované trubky

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{s_{\check{z}}} \cdot \left(\frac{d}{s_{\check{z}}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_{\check{z}}}{s_{\check{z}}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W_s \cdot s_{\check{z}}}{u_s}\right)^{0,72} \quad (12-14)$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{6,704 \cdot 10^{-2}}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,02958}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{6,509 \cdot 0,0125}{73,801 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 34,651 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Súčiniteľ β

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{t_{\check{z}} \cdot \lambda_{\check{z}} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k)}} \quad (12-15)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 34,651}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,011 \cdot 0,85 \cdot 34,651)}} = 33,351$$

$\psi_{\check{z}} = 0,85 [-]$ - súčiniteľ, charakterizujúci nerovnomerné rozloženie α_k po povrchu rebra [4]

$\lambda_{\check{z}} = 40 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ - súčiniteľ tepelnej vodivosti rebier [4]

$\varepsilon = 0,011 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$ - súčiniteľ znečistenia [4]

$E = 0,97 [-]$ - súčiniteľ efektívnosti rebra [4]

$\mu = 1 [-]$ - súčiniteľ rozšírenia rebra [4]

$$\alpha_{Sr} = \left(\frac{S_{\check{z}}}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\check{z}} \cdot \alpha_k} \quad (12-16)$$

$$\alpha_{Sr} = (0,459 \cdot 0,97 \cdot 1 + 0,541) \cdot \frac{0,85 \cdot 34,651}{1 + 0,01 \cdot 0,85 \cdot 34,651} = 21,940 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

12.4 Redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vnútornej strany

Tab. 12-4 Látkové vlastnosti vody pre strednú teplotu v ekonomizéri

| | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_v | $624,1733 \cdot 10^{-3}$ | [W/m · K] |
| Súčiniteľ dynamickej viskozity | η_v | $10,62 \cdot 10^{-5}$ | Pa · s |
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | $\nu_v = \eta_v \cdot \rho_v$ | $1,354 \cdot 10^{-7}$ | [m ² /s] |
| Prandtlovo číslo | Pr_v | 0,814 | [-] |

Teplota steny

$$t_{st} = \frac{t_v + t_s}{2} = \frac{256,6 + 475,7}{2} = 366,15 \text{ °C} \quad (12-17)$$

Súčiniteľ dynamickej viskozity pre teplotu steny

$$\eta_{st} = 2,401 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Opravný koeficient

$$C_t = \left(\frac{\eta_v}{\eta_{st}} \right)^{0,11} = \left(\frac{10,62 \cdot 10^{-5}}{2,401 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,11} = 1,178 \quad (12-18)$$

$$\alpha_{vR} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_v}{d} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d}{\nu_v} \right)^{0,8} \cdot Pr_v^{0,4} \cdot C_t \quad (12-19)$$

$$\alpha_{vR} = 0,023 \cdot \frac{624,1733 \cdot 10^{-3}}{0,02958} \cdot \left(\frac{1,165 \cdot 0,02958}{1,354 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,814^{0,4} \cdot 1,178 = 11118,388$$

$$\alpha_{vR} = 11118,388 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

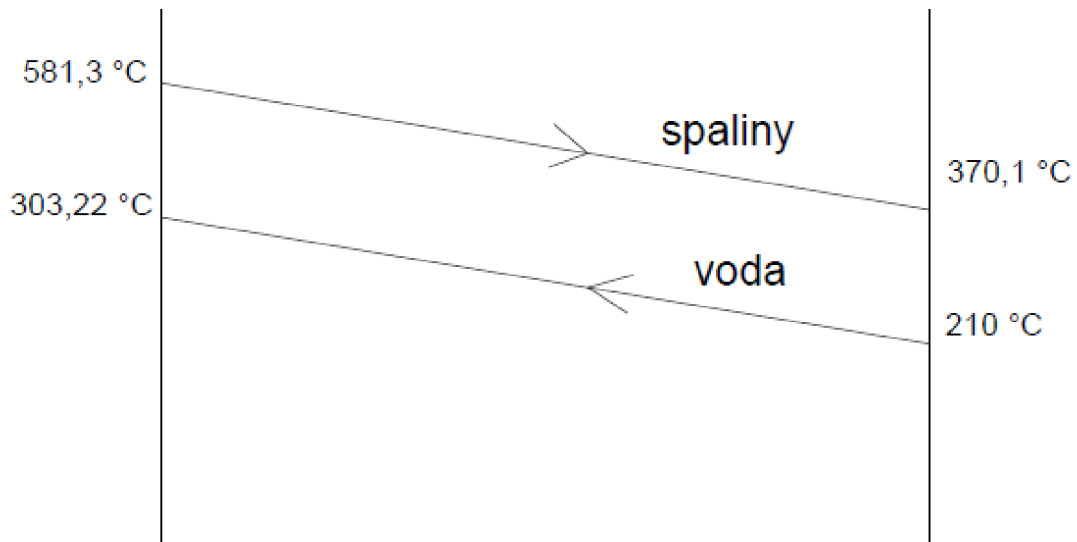
12.5 Súčiniteľ prostupu tepla

$$k_{cel} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Sr}} + \frac{1}{\alpha_{vR}} \cdot \frac{S_S}{S_v}} \quad (12-20)$$

$$k_{cel} = \frac{1}{\frac{1}{21,940} + \frac{1}{11118,388} \cdot \frac{5418,309}{1373,852}} = 21,771 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

12.6 Tepelný výkon ekonomizéra

Teplotný spád



Obr. 12-2 Teplotný spád ekonomizéra

$$\Delta t_{\text{in}} = t_{\text{s}}^{\text{in}} - t_{\text{v}}^{\text{in}} = 581,3 - 303,22 = 278,08 \text{ °C} \quad (12-21)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_{\text{s}}^{\text{out}} - t_{\text{v}}^{\text{out}} = 370,1 - 210 = 160,10 \text{ °C} \quad (12-22)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{278,08 - 160,10}{\ln\left(\frac{278,08}{160,10}\right)} = 213,689 \text{ °C} \quad (12-23)$$

Tepelný výkon

$$Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 21,771 \cdot 213,689 \cdot 5418,309 = 25207,183 \text{ kW} \quad (12-24)$$

Kontrola

$$\Delta Q_{\text{EKO}} = \frac{Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} - Q_{\text{EKO}}}{Q_{\text{EKO}}} \cdot 100 = \frac{25207,183 - 25179,791}{25179,791} \cdot 100 = 0,108\% \quad (12-25)$$

13 Ohřevač vzduchu

Ohřevač vzduchu je typu Ljungstrom, využívá teplo spalín na ohřevání spalovacího vzduchu na teplotu 350°C, čím zvyšuje účinnost kotla. Vzduch je před ohřevačem předhřátý v kaloriferu na teplotu 60°C, aby sa predchádzalo nízkoteplotnej korózii.

13.1 Návrh geometrie

| | |
|-------------------------|--|
| Priemer rotora: | $D = 7900 \text{ mm} = 7,9 \text{ m}$ |
| Výška rotora: | $h = 2230 \text{ mm} = 2,23 \text{ m}$ |
| Otáčky rotora: | $n = 1,25 \text{ min}^{-1}$ |
| Šírka spalinovej časti: | $a = 2850 \text{ mm} = 2,85 \text{ m}$ |
| Dĺžka spalinovej časti: | $b = 6300 \text{ mm} = 6,3 \text{ m}$ |
| Uhlová oblasť spalín: | $\omega_s = 225^\circ$ |
| Uhlová oblasť vzduchu: | $\omega_{vz} = 135^\circ$ |

$K_r = 0,92 [-]$ - súčiniteľ rotoru [4]

$S_1 = 325 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \right]$ - veľkosť obojstrannej výhrevnej plochy 1 m³ výplne rotoru [4]

Obojstranná výhrevná plocha

$$S = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot h \quad (13-1)$$

$$S = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 7,9^2 \cdot 0,92 \cdot 325 \cdot 2,23 = 31048,721 \text{ m}^2$$

13.2 Parametre vzduchu a spalín

Tab. 13-1 Parametre vzduchu a spalín pre ohřevač vzduchu

| Vstupné hodnoty | | | | Výstupné hodnoty | | | |
|-----------------|---------------|-------|----|------------------|----------------|-------|----|
| teplota vzduchu | t_{vz}^{in} | 60 | °C | teplota vzduchu | t_{vz}^{out} | 350 | °C |
| teplota spalín | t_s^{in} | 370,1 | °C | teplota spalín | t_s^{out} | 171,6 | °C |

Stredná teplota vzduchu

$$t_{vz} = \frac{t_{vz}^{in} + t_{vz}^{out}}{2} = \frac{60 + 350}{2} = 205 \text{ °C} \quad (13-2)$$

Stredná teplota spalín

$$t_s = \frac{t_s^{in} + t_s^{out}}{2} = \frac{370,1 + 171,6}{2} = 270,85 \text{ °C} \quad (13-3)$$

Spalinový díel

$$x_s = \frac{\omega_s}{360} = \frac{225}{360} = 0,625 \quad (13-4)$$

Vzduchový díel

$$x_{vz} = \frac{\omega_{vz}}{360} = \frac{135}{360} = 0,375 \quad (13-5)$$

Skutočný prietok spalín

$$V_s = M_{pv} \cdot O_{svmin} \cdot \alpha_k \cdot \frac{t_s + 273}{273} \quad (13-6)$$

$$V_s = 13,205 \cdot 4,751 \cdot 1,38 \cdot \frac{270,85 + 273}{273} = 172,452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Skutočný prietok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot O_{vvmin} \cdot \beta'_{ovz} \cdot \frac{t_{vz} + 273}{273} \quad (13-7)$$

$$V_{vz} = 13,205 \cdot 3,982 \cdot 1,08 \cdot \frac{205 + 273}{273} = 99,430 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Svetlý prierez spalín

$$F_s = a \cdot b = 2,85 \cdot 6,3 = 17,955 \text{ m}^2 \quad (13-8)$$

Rýchlosť prúdenia spalín

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} = \frac{172,452}{17,955} = 9,605 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (13-9)$$

Rýchlosť prúdenia vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{V_s} \cdot \frac{x_s}{x_{vz}} \cdot w_s = \frac{99,430}{172,452} \cdot \frac{0,625}{0,375} \cdot 9,605 = 9,230 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (13-10)$$

13.3 Súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín

Tab. 13-2 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v ohrievači vzduchu [5]

| | | | |
|----------------------------------|---------------|------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_s | $41,772 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_s | $4,724 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_s | 0,6967 | $[-]$ |

$$\alpha_{ks} = 0,037 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_s^{0,4} \quad (13-11)$$

$$\alpha_{ks} = 0,037 \cdot 1 \cdot \frac{4,724 \cdot 10^{-2}}{0,0096} \cdot \left(\frac{9,605 \cdot 0,0096}{41,772 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6967^{0,4}$$

$$\alpha_{ks} = 74,568 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$C_t = 1 [-] \quad - \text{opravný koeficient [4]}$$

$$d_e = 0,0096[\text{m}] \quad - \text{ekvivalentný priemer [4]}$$

13.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane vzduchu

Tab. 13-3 Látkové vlastnosti vzduchu pre strednú teplotu v ohrievači vzduchu [4]

| | | | |
|----------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Súčiniteľ kinematickej viskozity | ν_{vz} | $34,821 \cdot 10^{-6}$ | $[\text{m}^2/\text{s}]$ |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | λ_{vz} | $3,925 \cdot 10^{-2}$ | $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ |
| Prandtlovo číslo | Pr_{vz} | 0,69 | $[-]$ |

Teplota steny listu

$$t_{st} = \frac{x_s \cdot t_s + x_{vz} \cdot t_{vz}}{x_s + x_{vz}} = \frac{0,625 \cdot 270,85 + 0,375 \cdot 205}{0,625 + 0,375} = 246,156 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13-12)$$

Opravný koeficient

$$C_t = \left(\frac{t_{vz} + 273,15}{t_{st} + 273,15} \right)^{0,5} = \left(\frac{205 + 273,15}{246,156 + 273,15} \right)^{0,5} = 0,960 \quad (13-13)$$

$$\alpha_{vz} = 0,037 \cdot C_t \cdot \frac{\lambda_{vz}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d_e}{\nu_{vz}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{vz}^{0,4} \quad (13-14)$$

$$\alpha_{vz} = 0,037 \cdot 0,960 \cdot \frac{3,925 \cdot 10^{-2}}{0,0096} \cdot \left(\frac{9,230 \cdot 0,0096}{34,821 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4}$$

$$\alpha_{vz} = 66,355 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

13.5 Súčiniteľ prostupu tepla

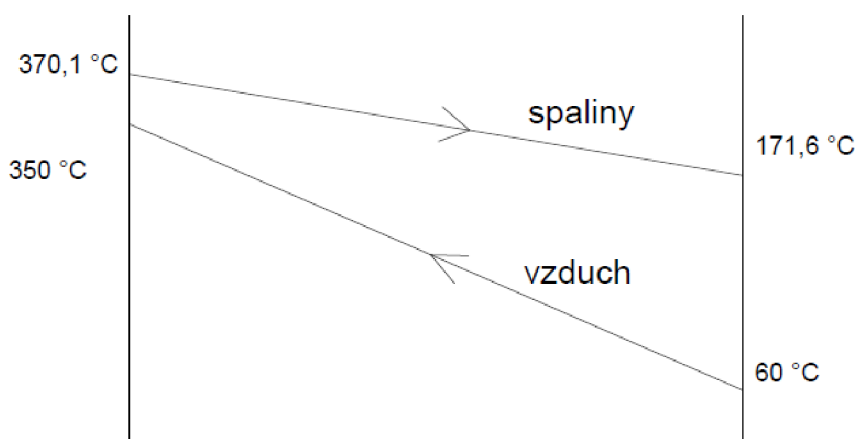
$$k_{\text{cel}} = \frac{\zeta_{\text{vz}} \cdot P}{\frac{1}{x_s \cdot \alpha_{\text{ks}}} + \frac{1}{x_{\text{vz}} \cdot \alpha_{\text{vz}}}} = \frac{0,85 \cdot 0,985}{\frac{1}{0,625 \cdot 74,568} + \frac{1}{0,375 \cdot 66,355}} = 13,582 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (13-15)$$

$\zeta_{\text{vz}} = 0,85 [-]$ - súčiniteľ využitia ohrievaču vzduchu [4]

$P = 0,985 [\text{m}]$ - parameter nestacionárneho zdieľania tepla [4]

13.6 Tepelný výkon ohrievača vzduchu

Teplotný spád



Obr. 13-1 Teplotný spád ohrievača vzduchu

$$\Delta t_{\text{in}} = t_s^{\text{in}} - t_{\text{vz}}^{\text{in}} = 370,1 - 350 = 20,1 \text{ °C} \quad (13-16)$$

$$\Delta t_{\text{out}} = t_s^{\text{out}} - t_{\text{vz}}^{\text{out}} = 171,6 - 60 = 111,6 \text{ °C} \quad (13-17)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{in}} - \Delta t_{\text{out}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{in}}}{\Delta t_{\text{out}}}\right)} = \frac{20,1 - 111,6}{\ln\left(\frac{20,1}{111,6}\right)} = 53,378 \text{ °C} \quad (13-18)$$

Tepelný výkon

$$Q_{\text{OVZ}}^{\text{skut}} = k_{\text{cel}} \cdot \Delta t \cdot S = 13,582 \cdot 53,378 \cdot 31048,721 = 22509,694 \text{ kW} \quad (13-19)$$

Kontrola

$$\Delta Q_{\text{OVZ}} = \frac{Q_{\text{OVZ}}^{\text{skut}} - Q_{\text{OVZ}}}{Q_{\text{OVZ}}} \cdot 100 = \frac{22509,694 - 22440,898}{22440,898} \cdot 100 = 0,307\% \quad (13-20)$$

14 Kontrola tepelnej bilancie

Výrobné teplo pary

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_w - i_{nv}) \quad (14-1)$$

$$Q_v = 65,278 \cdot (3434,2 - 903,24) + 0,005 \cdot 65,278 \cdot (1618 - 903,24) = 165448,734 \text{ kW}$$

Súčtový výkon kotla

$$Q^{\text{skut}} = Q_{\text{EKO}}^{\text{skut}} + Q_{\text{VYP}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH1}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH2}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH3}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH4}}^{\text{skut}} \quad (14-2)$$

$$Q^{\text{skut}} = 25207,183 + 69162,350 + 4626,228 + 27660,793 + 19273,920 + 19536,981$$

$$Q^{\text{skut}} = 165467,455 \text{ kW}$$

Odchýlka

$$\Delta Q = \frac{Q^{\text{skut}} - Q_v}{Q_v} \cdot 100 = \frac{165467,455 - 165448,734}{165448,734} \cdot 100 = 0,011\% \quad (14-3)$$

Odchýlka tepelnej bilancie nemôže prekročiť hodnotu $\pm 0,5 \%$. V tomto prípade je odchýlka $0,011 \%$, ktorá tejto podmienke vyhovuje.

15 Záver

Cieľom diplomovej práce bol tepelný výpočet a návrh kotla na spaľovanie uhlia pre výrobu vysokotlaktej pary s výkonom 235 t/h, tlakom 14 MPa a teplotou 540 °C, pri zníženej teplote napájacej vody 210 °C. Ako palivo je použité hnedé uhlie s vysokou vlhkosťou $W_t^r = 41,48 \%$ a hodnotou výhrevnosti $Q_i^r = 13,851 \text{ MJ/kg}$. Z toho dôvodu bol kotel navrhnutý ako práškový s granulačným ohniskom, keďže tieto ohniská sú menej citlivé na vysušenie paliva a jemnosť mletia. Taktiež sa v nich využíva nižšia teplota spaľovacieho vzduchu (300 až 350 °C), aby nedošlo k prekročeniu teplôt tečenia popola. Pre návrh kotla bola zvolená teplota spaľovacieho vzduchu 350 °C.

Na základe stechiometrických výpočtov a zvolených prebytkov vzduchu v kotle boli stanovené entalpie spaľovacieho vzduchu a spalín. Z následnej tepelnej bilancie kotla boli pomocou nepriamej metódy ako prvé určené jednotlivé tepelné straty kotla a potom účinnosť kotla $\eta = 88,782 \%$. Pri tejto účinnosti dosahuje kotel tepelný výkon $Q = 165,449 \text{ MW}$ pri potrebnom množstve privedeného paliva $M_{\text{pal}} = 47,851 \text{ t/h}$. V ďalšom kroku bola vypočítaná spaľovacia komora, v ktorej je umiestnených 8 tangenciálnych horákov v dvoch radoch a určená teplota spalín na konci ohniska $t_{\text{ok}} = 1249 \text{ °C}$.

Výpočet pokračoval návrhom tepelných výkonov jednotlivých výhrevných plôch zo strany pracovného média a zostrojením pilového diagramu. Ďalej nasledoval návrh geometrie a tepelný výpočet jednotlivých výhrevných plôch. Pri výpočte musí byť odchýlka tepelných bilancií jednotlivých výhrevných plôch maximálne 0,5 %. Spaliny pri prechode spalínovým kanálom postupne predávajú tepelnú energiu výparníku cez membránové trubky, za spaľovacou komorou nasleduje doskový prehrievač pary SH3, výstupný prehrievač pary SH4, mreža výparníka, prehrievač pary SH2, mreža stropného prehrievača pary SH1, ekonomizér a ohrievač vzduchu typu Ljungstrom, ktorý využíva teplo spalín na ohrievanie vzduchu a tým zvyšuje účinnosť kotla. Medzi prehrievačmi pary SH2 a SH3 a medzi prehrievačmi pary SH3 a SH4 sú zavedené vstreky napájacej vody, ktoré slúžia k regulácii výkonu kotla. Teplota pary na výstupe z kotla nemôže kolísať o viac ako 10 °C, čo je zaistené správnym dimenzovaním regulačných vstrekov. Oblasti prehrievačov pary SH3, SH4, SH2 a mreža výparníka sú doplnené o paralelné plochy - výparníkové trubky a stropný prehrievač pary SH1.

Návrh kotla bol ukončený kontrolou celkovej tepelnej bilancie kotla, ktorej výsledok musí byť v tolerancii $\pm 0,5 \%$. Pri výpočte bola dosiahnutá odchýlka 0,011 %, ktorá tejto podmienke vyhovuje. Spaliny na konci kotla majú teplotu 171,6 °C, čo je dostatočné pre nepodkroenie teploty rosného bodu vodnej pary a síry obsiahnutej v spalínach. Čím sa predíde nízkoteplotnej korózii.

16 Zoznam použitej literatúry

- [1] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 864 s. Technický průvodce.
- [2] ČERNÝ, Václav. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1986, 240 s.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [4] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 212 s. ISBN 80-01-02591-8.
- [5] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992, 200 s. ISBN 80-214-0426-4.
- [6] Firemné podklady
- [7] HOLMGREN. X Steam: IAPWS IF97 Excel Steam Tables. Version 2.6. 2006.

17 Zoznam použitých skratiek a symbolov

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| a | [m] | šírka spaľovacej komory |
| a | [–] | stupeň černosti prúdu spalín |
| A | [m] | šírka spalinového kanála |
| A ^r | [%] | obsah popola |
| a _o | [–] | stupeň černosti ohniska |
| a _{pl} | [–] | stupeň černosti plameňa |
| a _{st} | [–] | stupeň černosti povrchu stien |
| a _ú | [%] | pomerný úlet popolčeka z ohniska |
| α, β | [–] | súčinitele prebytku vzduchu |
| Δα ₀ | [–] | prisávanie v ohnisku |
| α _k | [–] | súčiniteľ prebytku vzduchu za kotlom |
| α _k | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla pre rebrované trubky |
| Δα _{ml} | [–] | prisávanie vzduchu v mlynici |
| α _{ks} ^{po} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín pri pozdĺžnom obtekaní trubiek |
| α _{ks} ^{pr} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín pri priečnom obtekaní trubiek |
| α _p | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla na strane pary |
| α _s ^{po} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín pre pozdĺžne prúdenie |
| α _s ^{pr} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín pre priečne prúdenie |
| α _{sal} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla sálaním |
| α _{Sr} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vonkajšej strany |
| α _{Vr} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | redukovaný súčiniteľ prestupu tepla z vnútornej strany |
| α _{vz} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prestupu tepla na strane vzduchu |
| b | [m] | hĺbka spaľovacej komory |
| B | [m] | hĺbka spalinového kanála |
| Bo | [–] | Boltzmannovo číslo |
| β _{OVZ} ' | [–] | súčiniteľ prebytku vzduchu na vstupe do ohrievača vzduchu |
| c | [m] | šírka výstupného okna |
| C | [m] | výška spalinového kanála |
| C _l | [–] | korekčný súčiniteľ |
| C ^r | [%] | obsah uhlíka |
| c _{pV} | [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | tepelná kapacita tuhého paliva |
| C _s | [–] | podiel horľaviny vo škváre |
| C _s | [–] | korekčný súčiniteľ na usporiadanie zväzku |
| c _s | [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | merná tepelná kapacita tuhých zvyškov (škvára) |
| c _{su} | [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | merné teplo sušiny pre hnědé uhlie |
| C _t | [–] | opravný koeficient |
| C _ú | [–] | podiel horľaviny v úlete |
| c _ú | [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | merná tepelná kapacita tuhých zvyškov (úlet) |
| C _z | [–] | korekčný súčiniteľ na počet radov zväzku |
| d | [m] | vnútorný priemer trubky |

| | | |
|----------------------------|--|--|
| D | [m] | vonkajší priemer trubky |
| d_e | [m] | ekvivalentný priemer |
| d_{pk} | [μm] | stredný efektívny priemer častíc popolčeka |
| $D_{\check{z}}$ | [m] | priemer rebra |
| δ | [–] | súčiniteľ vyjadrujúci podiel tepelného toku |
| e | [m] | šírka spodného skosenia spaľovacej komory |
| E | [–] | súčiniteľ efektívnosti rebra |
| ε | [–] | súčiniteľ zanesenia |
| η_k | [%] | tepelná účinnosť kotla |
| η_p | [Pa · s] | súčiniteľ dynamickej viskozity pary |
| η_v | [Pa · s] | súčiniteľ dynamickej viskozity vody |
| f | [m] | výška spodného skosenia spaľovacej komory |
| F_s | [m ²] | svetlý prierez spalín |
| φ | [%] | relatívna vlhkosť |
| φ_σ | [–] | parameter |
| g | [m] | dĺžka horného skosenia spaľovacej komory |
| G_s | [kg · kg ⁻¹] | hmotnosť spalín |
| h | [m] | výška horného skosenia spaľovacej komory |
| H | [m] | celková výška spaľovacej komory |
| H^r | [%] | obsah vodíku |
| $h_{\check{z}}$ | [m] | výška rebra |
| χ_v | [–] | podiel vodnej pary |
| i_{Ar}^t | [kJ · Nm ⁻³] | merná entalpia argónu |
| $i_{CO_2}^t$ | [kJ · Nm ⁻³] | merná entalpia oxidu uhličitého |
| $i_{H_2O}^t$ | [kJ · Nm ⁻³] | merná entalpia vody |
| i^{in} | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia na vstupe |
| $i_{N_2}^t$ | [kJ · Nm ⁻³] | merná entalpia dusíka |
| i_{nv} | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia napájajúcej vody |
| i^{out} | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia na výstupe |
| i_{pop}^t | [kJ · kg ⁻¹] | merná entalpia popolčeka |
| i_{pp} | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia prehriatej pary na výstupe z kotla |
| i_{pv} | [kJ · kg ⁻¹] | fyzické teplo paliva |
| $i_{SO_2}^t$ | [kJ · Nm ⁻³] | merná entalpia oxidu siričitého |
| I_{Smin}^t | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia minimálneho množstva spalín |
| $I_S^{t,\alpha}$ | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia spalín |
| $I_S^{t_k,\alpha_k}$ | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia spalín za kotlom |
| $I_S^{t_{ok},\alpha_{ok}}$ | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia spalín na výstupe z ohniska |
| $I_V^{t_f}$ | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia prisávaného vdychu |
| $I_V^{t_{ovz}}$ | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia riadeného vzduchu do kotla |
| I_{Vmin}^t | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia minimálneho množstva vzduchu |
| ΔI_{VVmin} | [kJ · kg ⁻¹] | zvýšenie entalpie stechiometrického množstva vzduchu |
| I_{VZ} | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia vzduchu |
| i_w | [kJ · kg ⁻¹] | entalpia sýtej vody v bubne |
| j | [m] | spodná šírka dosky |
| k | [m] | rozmer dosky |
| k_{cel} | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | súčiniteľ prostupu tepla |

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| k_{kok} | [-] | súčiniteľ zoslabenia sárania koksíkovými časticami |
| $k_p \cdot \mu_{\text{pk}}$ | [-] | súčiniteľ zoslabenia sárania popolčekovými časticami |
| k^{po} | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ prostupu tepla pre pozdĺžne prúdenie |
| k^{pr} | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ prostupu tepla pre priečne prúdenie |
| $k \cdot p \cdot s$ | [-] | optická hustota plameňa |
| K_r | [-] | súčiniteľ rotoru |
| $k_s \cdot r_s$ | [-] | súčiniteľ zoslabenia sárania trojatómovými plynmi |
| κ_1, κ_2 | [-] | súčinitele zohľadňujúce koncentráciu koksíku v plameni |
| l | [m] | výška dosky |
| λ_p | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ tepelnej vodivosti pary |
| λ_s | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín |
| λ_v | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ tepelnej vodivosti vody |
| λ_z | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ | súčiniteľ tepelnej vodivosti rebier |
| m | [-] | podiel tepla vysálaného z ohniska a odovzdaného do priestoru |
| mgCO | $[\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$ | emisný limit oxidu uhoľnatého |
| M | [-] | súčiniteľ M |
| M_o | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | množstvo odľahu |
| M_{pal} | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | skutočné množstvo paliva privedeného do kotla |
| M_{pp} | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | množstvo prehriatej pary |
| M_{pv} | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | výpočtové množstvo spáleného paliva |
| M_{vs1} | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | množstvo prvého vstreku |
| M_{vs2} | $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | množstvo druhého vstreku |
| μ_{pk} | [-] | koncentrácia popola v spaliniách |
| μ | [-] | súčiniteľ rozšírenia rebra |
| n | $[\text{min}^{-1}]$ | otáčky rotoru |
| n_d | [-] | počet dosiek |
| N^r | [%] | obsah dusíka |
| n_r | [-] | počet radov |
| n_{tr} | [-] | počet trubiek |
| n_z | [-] | počet rebier |
| $O_{\text{O}_2\text{min}}$ | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | minimálny objem kyslíku |
| O^r | [%] | obsah kyslíka |
| $O_{2\text{ref}}$ | [%] | obsah kyslíka pre referenčné množstvo spalín |
| O_{Ar} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem argónu v spaliniách |
| O_{CO_2} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem oxidu uhličitého v spaliniách |
| $O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}}$ | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem vodnej pary v min. objeme vlh. spalín |
| $O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}}$ | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem vodnej pary |
| O_{N_2} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem dusíka v spaliniách |
| $(O_{\text{SCS}})_o$ | $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$ | stredná tepelná pohltivosť spalín v ohnisku |
| O_{SO_2} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | objem oxidu siričitého v spaliniách |
| O_{SSmin} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | minimálne množstvo suchých spalín |
| O_{SV} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | skutočné množstvo spalín |
| O_{SVmin} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | minimálny objem vlhkých spalín |
| O_{VS} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | skutočné množstvo vzduchu |
| O_{VSmin} | $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ | minimálny objem suchého vzduchu |

| | | |
|------------------|------------------------|---|
| O_{VVmin} | $[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$ | minimálny objem vlhkého vzduchu |
| ω | $[-]$ | súčiniteľ omývania plochy |
| ω_s | $[^\circ]$ | uhlová oblasť spalín |
| ω_{vz} | $[^\circ]$ | uhlová oblasť vzduchu |
| p | $[Pa]$ | tlak za normálnych podmienok |
| P | $[m]$ | parameter nestacionárneho zdieľania tepla |
| p'' | $[Pa]$ | parciálny tlak vodnej pary na medzi sýtosti |
| Δp_{EKO} | $[Pa]$ | tlaková strata ekonomizéra |
| Δp_{SH1} | $[Pa]$ | tlaková strata prehrievača SH1 |
| Δp_{SH2} | $[Pa]$ | tlaková strata prehrievača SH2 |
| Δp_{SH3} | $[Pa]$ | tlaková strata prehrievača SH3 |
| Δp_{SH4} | $[Pa]$ | tlaková strata prehrievača SH4 |
| Δp_{VYP} | $[Pa]$ | tlaková strata výparníka |
| p_c | $[Pa]$ | celkový tlak |
| p^{in} | $[Pa]$ | vstupný tlak |
| p_{nv} | $[Pa]$ | tlak napájacej vody |
| p^{out} | $[Pa]$ | výstupný tlak |
| p_{pp} | $[Pa]$ | výstupný tlak pary |
| Pr_p | $[-]$ | Prandtlovo číslo pary |
| Pr_s | $[-]$ | Prandtlovo číslo spalín |
| Pr_v | $[-]$ | Prandtlovo číslo vody |
| p_s | $[Pa]$ | parciálny tlak trojatómových plynov v spalínach |
| ψ | $[-]$ | súčiniteľ tepelnej efektívnosti |
| r_{H_2O} | $[-]$ | objemový podiel vodnej pary v spalínach |
| r_{RO_2} | $[-]$ | objemový podiel trojatómových plynov |
| r_s | $[-]$ | súčet objemových podielov trojatómových plynov |
| Q | $[kW]$ | tepelný výkon výhrevnej plochy |
| ΔQ | $[\%]$ | odchýlka výkonu výhrevnej plochy od navrhnutého výkonu |
| Q^{skut} | $[kW]$ | skutočný tepelný výkon výhrevnej plochy |
| Q_c | $[kW]$ | celkový tepelný výkon |
| Q_{ci} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhrevnosť horľaviny |
| Q_{cz} | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | teplo privedené cudzím zdrojom |
| Q_i^f | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | výhrevnosť paliva |
| $Q_{i red}$ | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | redukovaná výhrevnosť paliva |
| Q_o | $[kW]$ | tepelný výkon zachytený v priestore ohniska |
| Q_{ods} | $[kW]$ | tepelný výkon pripadajúci na výstupný prierez ohniska |
| Q_{pl} | $[kW]$ | tepelný výkon pripadajúci na trubky výparníka |
| q_{st} | $[kW \cdot m^{-2}]$ | stredný tepelný tok do stien |
| Q_u | $[kJ \cdot kg^{-1}]$ | celkové užitočné teplo uvoľnené v ohnisku |
| q_v | $[kW \cdot m^{-3}]$ | objemové tepelné zaťaženie ohniska |
| Q_v | $[kW]$ | výrobné teplo pary |
| Q_{vz} | $[kW]$ | teplo privedené vo vzduchu |
| s | $[m]$ | účinná hrúbka sálavej vrstvy |
| s | $[m]$ | hrúbka steny trubky |
| S | $[m^2]$ | povrch výhrevnej plochy |
| s_1 | $[m]$ | priečna rozteč |
| S_1 | $[m^2 \cdot m^{-3}]$ | veľkosť oboj. výhrevnej plochy 1 m ³ výplne rotora |

| | | |
|---------------------------|--------------------------------------|--|
| s_2 | [m] | pozdĺžna rozteč |
| S_d | [m ²] | plocha dosky |
| s_{d1} | [m] | pozdĺžna šírka dosky |
| s_{d2} | [m] | priečna šírka dosky |
| S^r | [%] | obsah síry |
| S_h | [m ²] | plocha horákov |
| $\frac{S_h}{S}$ | [-] | podiel výhrevných plôch bez rebier a celkovej plochy |
| S_{prch}^r | [%] | obsah prchavej zložky síry |
| S_{st} | [m ²] | celkový povrch stien ohniska |
| S_{str} | [m ²] | plocha stien s trubkami |
| S_{trubky} | [m ²] | povrch trubky |
| $S_{ús}$ | [m ²] | účinná sálavá plocha stien ohniska |
| $S_{úsvo}$ | [m ²] | účinná sálavá plocha výstupného prierezu ohniska |
| S_{vo} | [m ²] | plocha výstupného okna |
| $S_{vš}$ | [m ²] | plocha výsyvky škváry |
| $s_{\check{z}}$ | [m] | rozteč rebier |
| $S_{\check{z}}$ | [m ²] | plocha rebra |
| $\frac{S_{\check{z}}}{S}$ | [-] | podiel výhrevných plôch rebier a celkovej plochy |
| σ_1 | [-] | pomerná priečna rozteč |
| σ_2 | [-] | pomerná pozdĺžna rozteč |
| σ_2' | [-] | pomerná uhlopriečna rozteč |
| Δt | [°C] | teplotný spád |
| Δt_{in} | [°C] | teplotný spád na vstupe |
| Δt_{out} | [°C] | teplotný spád na výstupe |
| t^{in} | [°C] | vstupná teplota |
| t_{np} | [°C] | teplota nechladeného plameňa |
| t_{nv} | [°C] | teplota napájacej vody |
| t_{ok} | [°C] | teplota spalín na konci ohniska |
| t^{out} | [°C] | výstupná teplota |
| t_p | [°C] | stredná teplota pary |
| t_{pp} | [°C] | výstupná teplota pary |
| t_{pv} | [°C] | teplota paliva |
| t_{sk} | [°C] | teplota škváry |
| t_s | [°C] | stredná teplota spalín |
| t_{st} | [°C] | teplota steny |
| $t_{ú}$ | [°C] | teplota úletu |
| t_v | [°C] | stredná teplota napájacej vody |
| t_{vz} | [°C] | stredná teplota vzduchu |
| t_z | [°C] | teplota povrchu nánosu na strane spalín |
| $t_{\check{z}}$ | [m] | hrúbka rebra |
| v^{in} | [m ³ · kg ⁻¹] | vstupný merný objem |
| V_o | [m ³] | aktívny objem ohniska |
| v^{out} | [m ³ · kg ⁻¹] | výstupný merný objem |
| v_p | [m ³ · kg ⁻¹] | stredný merný objem pary |
| V_s | [m ³ · s ⁻¹] | skutočný prietok spalín |
| v_v | [m ³ · kg ⁻¹] | stredný merný objem napájacej vody |
| V_{vz} | [m ³ · s ⁻¹] | skutočný prietok vzduchu |

| | | |
|--------------|----------------------|---|
| w_p | $[m \cdot s^{-1}]$ | rýchlosť prúdenia pary |
| W_t^I | [%] | obsah vody |
| w_s | $[m \cdot s^{-1}]$ | rýchlosť prúdenia spalín |
| w_v | $[m \cdot s^{-1}]$ | rýchlosť prúdenia vody |
| w_{vz} | $[m \cdot s^{-1}]$ | rýchlosť prúdenia vzduchu |
| x | [-] | uhlový súčiniteľ osálenia |
| x_s | [-] | spalinový diel |
| X_s | [-] | podiel popola vo škváre |
| $X_{ú}$ | [-] | podiel popola v úlete |
| x_{vz} | [-] | vzduchový diel |
| ξ | [-] | súčiniteľ využitia plochy |
| y_h | [-] | súčiniteľ tepelnej nerovnomernosti po výške ohniska |
| ν_p | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | súčiniteľ kinematickej viskozity pary |
| ν_s | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | súčiniteľ kinematickej viskozity spalín |
| ν_v | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | súčiniteľ kinematickej viskozity vody |
| Z_c | [%] | strata mechanickým nedopalom |
| Z_{co} | [%] | strata chemickým nedopalom |
| Z_{cs} | [%] | strata v škváre alebo struske |
| $Z_{cú}$ | [%] | strata v úlete |
| Z_f | [%] | strata fyzickým teplom tuhých zvyškov |
| Z_{fs} | [%] | strata fyzickým teplom tuhých zvyškov vo škváre |
| $Z_{fú}$ | [%] | strata fyzickým teplom tuhých zvyškov v úlete |
| Z_k | [%] | strata citelným teplom spalín (komínová) |
| Z_{sv} | [%] | strata sálaním a vedením tepla do okolia |
| Z_{sv}^o | [%] | pomerná strata sálaním a vedením tepla do okolia |
| ζ | [-] | súčiniteľ zanesenia stien ohniska |
| ζ_{vz} | [-] | súčiniteľ využitia ohrievača vzduchu |

18 Zoznam tabuliek

| | |
|---|-----|
| Tab. 2-1 Zloženie paliva..... | 22 |
| Tab. 2-2 Súčinitele prebytku vzduchu..... | 24 |
| Tab. 2-3 Merná entalpia niektorých zložiek spalín v závislosti na teplote [4]..... | 25 |
| Tab. 2-4 Entalpia vzduchu a spalín pre rôzne súčinitele prebytku vzduchu..... | 26 |
| Tab. 4-1 Rozmery spaľovacej komory..... | 31 |
| Tab. 5-1 Zadané hodnoty..... | 38 |
| Tab. 5-2 Tlakové straty konvekčných plôch..... | 38 |
| Tab. 5-3 Vstreky a odluh..... | 38 |
| Tab. 5-4 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH4..... | 39 |
| Tab. 5-5 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH3..... | 39 |
| Tab. 5-6 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH2..... | 40 |
| Tab. 5-7 Parametre pary na vstupe a výstupe z SH1..... | 41 |
| Tab. 5-8 Parametre pary/vody na vstupe a výstupe z výparníka..... | 41 |
| Tab. 5-9 Parametre vody na vstupe a výstupe z ekonomizéra..... | 41 |
| Tab. 5-10 Tepelná bilancia na strane média..... | 42 |
| Tab. 5-11 Tepelná bilancia na strane spalín..... | 43 |
| Tab. 6-1 Rozvrhnutie výpočtu konvekčných plôch..... | 45 |
| Tab. 7-1 Parametre pary pre prehrievač SH3..... | 47 |
| Tab. 7-2 Parametre spalín pre prehrievač SH3..... | 47 |
| Tab. 7-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH3 [5]..... | 49 |
| Tab. 7-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH3..... | 50 |
| Tab. 7-5 Parametre spalín a pary pre prvý úsek stropného prehrievača SH1..... | 54 |
| Tab. 7-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1..... | 55 |
| Tab. 7-7 Parametre spalín a parovodnej zmesi pre trubky výparníka na stenách..... | 57 |
| Tab. 8-1 Parametre pary pre prehrievač SH4..... | 60 |
| Tab. 8-2 Parametre spalín pre prehrievač SH4..... | 60 |
| Tab. 8-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH4 [5]..... | 61 |
| Tab. 8-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH4..... | 62 |
| Tab. 8-5 Parametre spalín a pary pre druhý úsek stropného prehrievača SH1..... | 66 |
| Tab. 8-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1..... | 67 |
| Tab. 8-7 Parametre spalín a parovodnej zmesi pre trubky výparníka na stenách..... | 69 |
| Tab. 9-1 Parametre parovodnej zmesi pre mrežu výparníka..... | 72 |
| Tab. 9-2 Parametre spalín pre mrežu výparníka..... | 72 |
| Tab. 9-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v mreži výparníka [5]..... | 73 |
| Tab. 9-4 Parametre spalín a pary pre tretí úsek stropného prehrievača SH1..... | 78 |
| Tab. 9-5 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1..... | 78 |
| Tab. 10-1 Parametre pary pre prehrievač SH2..... | 82 |
| Tab. 10-2 Parametre spalín pre prehrievač SH2..... | 82 |
| Tab. 10-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v prehrievači SH2 [5]..... | 83 |
| Tab. 10-4 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH2..... | 84 |
| Tab. 10-5 Parametre spalín a pary pre štvrtý úsek stropného prehrievača SH1..... | 89 |
| Tab. 10-6 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1..... | 90 |
| Tab. 11-1 Parametre spalín a pary pre mrežu stropného prehrievača SH1..... | 93 |
| Tab. 11-2 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v mreži strop. prehrievača SH1 [5]..... | 94 |
| Tab. 11-3 Látkové vlastnosti pary pre strednú teplotu v prehrievači SH1..... | 95 |
| Tab. 12-1 Parametre vody pre ekonomizér..... | 101 |
| Tab. 12-2 Parametre spalín pre ekonomizér..... | 101 |
| Tab. 12-3 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v ekonomizéri [5]..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 12-4 Látkové vlastnosti vody pre strednú teplotu v ekonomizéri..... | 104 |
| Tab. 13-1 Parametre vzduchu a spalín pre ohrievač vzduchu..... | 106 |
| Tab. 13-2 Látkové vlastnosti spalín pre strednú teplotu v ohrievači vzduchu [5]..... | 108 |
| Tab. 13-3 Látkové vlastnosti vzduchu pre strednú teplotu v ohrievači vzduchu [4]..... | 108 |

19 Zoznam obrázkov

| | |
|---|-----|
| Obr. 1-1 Umiestenie horákov v ohniskách parných kotlov [3] | 18 |
| Obr. 1-2 Granulačný kotol s horákmi v hornej časti spaľovacej komory [3]..... | 19 |
| Obr. 1-3 Dvojpriestorový výtavný kotol [3]..... | 21 |
| Obr. 4-1 Schéma spaľovacej komory | 31 |
| Obr. 5-1 Schéma vstreku 2 | 39 |
| Obr. 5-2 Schéma vstreku 1 | 40 |
| Obr. 5-3 Pilový diagram | 44 |
| Obr. 6-1 Rozvrhnutie výpočtu konvekčných plôch..... | 45 |
| Obr. 7-1 Geometria doskového prehrievača SH3..... | 46 |
| Obr. 7-2 Teplotný spád doskového prehrievača SH3 | 53 |
| Obr. 7-3 Teplotný spád prvého úseku stropného prehrievača SH1 | 56 |
| Obr. 7-4 Teplotný spád trubiek výparníka na stenách..... | 58 |
| Obr. 8-1 Geometria výstupného prehrievača SH4 | 59 |
| Obr. 8-2 Teplotný spád prehrievača SH4 | 65 |
| Obr. 8-3 Teplotný spád druhého úseku stropného prehrievača SH1 | 68 |
| Obr. 8-4 Teplotný spád trubiek výparníku na stenách..... | 70 |
| Obr. 9-1 Geometria mreže výparníka | 71 |
| Obr. 9-2 Teplotný spád mreže výparníka | 77 |
| Obr. 9-3 Teplotný spád tretieho úseku stropného prehrievača SH1 | 80 |
| Obr. 10-1 Geometria prehrievača SH2 | 81 |
| Obr. 10-2 Teplotný spád prehrievača SH2 | 88 |
| Obr. 10-3 Teplotný spád štvrtého úseku stropného prehrievača SH1 | 91 |
| Obr. 11-1 Geometria mreže stropného prehrievača SH1 | 92 |
| Obr. 11-2 Teplotný spád mreže prehrievača SH1 | 98 |
| Obr. 12-1 Geometria ekonomizéru | 100 |
| Obr. 12-2 Teplotný spád ekonomizéra | 105 |
| Obr. 13-1 Teplotný spád ohrievača vzduchu..... | 109 |

20 Zoznam príloh

1. Výkresová dokumentácia kotla A1-DP-VUT-FSI-EI