

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Spalovací komora pro Flexibilní energetický systém

Combustion chamber for the Flexible Energy System

Student:

Bc. Jakub Janečka

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Janečka**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Spalovací komora pro Flexibilní energetický systém  
Combustion Chamber for the Flexible Energy System**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši pro FES a pro roštová ohniště
2. Proved'te stechiometrické výpočty a výpočet účinnosti kotle
3. Navrhněte schéma zapojení na straně voda-pára
4. Stanovte teplotu na výstupu ze spalovací komory a množství vyrobené páry
5. Vypracujte výpočtový projekt spalovací komory

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02591-8.  
<http://projekty.fs.vsb.cz/414/?ucebni-opory>


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



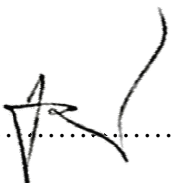
  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2014



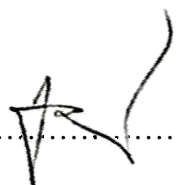
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16. 5. 2014



.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jakub Janečka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Stanislava Kostky Neumanna 1642, Frýdek-Místek,  
73801

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Janečka, J. *Spalovací komora pro Flexibilní energetický systém: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 54 s. Vedoucí práce: Vilimec L.

Práce se zabývá návrhem spalovací komory pro flexibilní energetický systém. V úvodu zpracovávám rešerši pro flexibilní energetický systém a také pro roštová ohniště. Dále pokračuji stechiometrickými výpočty a výpočtem účinnosti kotle. Navrhuji schéma zapojení na straně voda-pára s jeho popisem, stanovuji teplotu na výstupu ze spalovací komory a množství vyrobené páry. Poslední částí mé práce bude vytvořit výpočtový projekt spalovací komory, čímž se myslí výkres navrhovaného kotle.

## ANOTATION OF THESIS

Bc. Janečka, J. *Combustion chamber for the Flexible Energy System: Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2014, 54 p. Thesis head: Vilimec L.

The thesis deals with the design of the combustion chamber for flexible energy system. At the beginning I am working on search processing for flexible energy system and also for grate fireplace. Next is stoichiometrics calculation and calculation of boiler efficiency. I suggest diagram on the side of the water-steam, specify the temperature at the outlet of the combustion chamber and the quantity of steam produced. The last part of my thesis is to create computational design of the combustion chamber which means the drawing our boiler.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	7
Úvod.....	11
Vypracování.....	12
1. Flexibilní energetický systém.....	13
2. Roštová ohniště .....	15
2.1 Účinná plocha roštu .....	19
2.2 Druhy roštů .....	20
3. Zadání .....	27
4. Výpočet.....	28
4.1 Stechiometrické výpočty.....	29
4.2 Účinnost kotle .....	33
5. Schéma zapojení na straně voda – pára .....	36
6. Stanovení teploty na výstupu ze spalovací komory .....	38
7. Výpočtový projekt spalovací komory .....	46
Závěr .....	51
Seznam použité literatury .....	52
Příloha.....	53

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
$Q_i'$	Výhřevnost	$MJ / kg_{pal}$
$\beta$	Podmínka poměrného objemu tříatomových plynů	-
$\omega_{RO2MAX}$	Podmínka poměrného objemu tříatomových plynů	-
$V_{O_2,t}$	Minimální množství kyslíku	$m^3_n / kg_{pal}$
$V_{vz,t}^S$	Minimální množství suchého vzduchu	$m^3_n / kg$
$V_{vz,SK}^S$	Skutečný objem suchého vzduchu	$m^3_n / kg_{pal}$
$V_{CO_2}$	Objem oxidu uhličitého	$m^3_n / kg$
$V_{SO_2}$	Objem oxidu siřičitého	$m^3_n / kg$
$V_{N_2}$	Objem dusíku	$m^3_n / kg$
$V_{AR}$	Objem argonu	$m^3_n / kg$
$V_{O_2}$	Objem kyslíku	$m^3_n / kg$
$V_{H_2O}$	Objem vodní páry	$m^3_n / kg$
$V_{sp,sk}^v$	Objem vlhkých spalin	$m^3_n / kg$
$V_{sp,sk}^s$	Objem suchých spalin	$m^3_n / kg$
$\omega_{SS,CO_2}$	Koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	%
$\omega_{SS,SO_2}$	Koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	%
$\omega_{SS,N_2}$	Koncentrace oxidu dusíku v suchých spalinách	%
$\omega_{SS,O_2}$	Koncentrace kyslíku v suchých spalinách	%
$\omega_{SS,AR_2}$	Koncentrace argonu v suchých spalinách	%
$\alpha$	Přebytek vzduchu za kotlem	-
$t$	Teplota spalin za kotlem	°C
$P$	Parní výkon kotle	$t / h$
$\chi$	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	-

Tab. 1 – Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
$V_{vz,t}^V$	Minimální množství vlhkého vzduchu	$m^3_n / kg$
$V_{vz,SK}^V$	Skutečný objem vlhkého vzduchu	$m^3_n / kg$
$V_{sp,c}^V$	Objem vlhkých spalin (přepočet pro 120 stupňů)	%
$\omega_{vs,CO_2}$	Koncentrace oxidu uhličitého ve vlhkých spalinách	%
$\omega_{vs,SO_2}$	Koncentrace oxidu siřičitého ve vlhkých spalinách	%
$\omega_{vs,N_2}$	Koncentrace oxidu dusíku ve vlhkých spalinách	%
$\omega_{vs,O_2}$	Koncentrace kyslíku ve vlhkých spalinách	%
$\omega_{vs,AR}$	Koncentrace argonu ve vlhkých spalinách	%
$\omega_{vs,H_2O}$	Koncentrace vody ve vlhkých spalinách	%
$C_{pCO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého ve spalinách	$kJ * kg^{-1} * K^{-1}$
$C_{pSO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého ve spalinách	$kJ * kg^{-1} * K^{-1}$
$C_{pN_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu dusíku ve spalinách	$kJ * kg^{-1} * K^{-1}$
$C_{pH_2O}$	Měrná tepelná kapacita vodní páry ve spalinách	$kJ * kg^{-1} * K^{-1}$
$C_{psp}$	Měrná tepelná kapacita spalin celková	$kJ * kg^{-1} * K^{-1}$
$z_0$	Veličina potřebná pro stanovení obsahu spalitelných látek	%
$a_s$	Veličina potřebná pro stanovení obsahu spalitelných látek	%
$C_{pop}$	Obsah spalitelných látek v popílku	%
$z_{c,str}$	Mechanický nedopal ve strusce	%
$z_{c,pop}$	Mechanický nedopal v popílku	%
$z_c$	Celková ztráta nedopalem	%
$z_k$	Komínová ztráta	%
$z_{CO}$	Ztráta chemickým nedopalem	%
$z_{f,str}$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve strusce	%
$z_{f,pop}$	Ztráta fyzickým teplem v popílku	%

Tab. 2 – Seznam použitých značek a symbolů



Značka	Veličina	Jednotka
$Z_{SO}$	Ztráta sáláním tepla do okolí	%
$\eta_k$	Celková účinnost kotle	%
$m_{pal}$	Množství spotřeby paliva při jmenovitém výkonu kotle	kg / s
$C_{p,vzd,160}$	Tepelná kapacita vzduchu pro 160 stupňů	$kJ * m^{-3} * K^{-1}$
$Q_{vzd}$	Teplo přivedené vzduchem do kotle	MW
$Q_{pal,c}$	Celkové teplo přivedené do kotle	MW
$S_{roš}$	Činná plocha roštu	$m^2$
$q_{roš}$	Plošné zatížení roštu	$kW / m^2$
$S_{spal,k}$	Činná plocha spalovací komory	$m^2$
$q_{spal}$	Průřezové zatížení spalovací komory	$kW / m^2$
$V_{spk}$	Objem spalovací komory	$m^3$
$q_{v,spal}$	Objemové zatížení spalovací komory	$kW / m^3$
$q_v$	Efektivnost spalování	$kW / m^3$
$F_{celk}$	Celková sálavá plocha stěn ohniště	$m^2$
$F_{úsp}$	Účinná sálavá plocha stěn ohniště	$m^2$
$\Theta_{OK}$	Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště	-
$Q_u$	Teplota nechlazeného plamene	$kJ * kg^{-1}$
$i_{sp,c}$	Celková entalpie spalin	$kJ * kg^{-1}$
$i_{CO_2}$	Entalpie oxidu uhličitého ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$
$i_{SO_2}$	Entalpie oxidu siřičitého ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$
$i_{N_2}$	Entalpie oxidu dusíku ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$
$i_{AR}$	Entalpie argonu ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$
$i_{H_2O}$	Entalpie vodní páry ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$
$i_{O_2}$	Entalpie kyslíku ve spalinách	$kJ * kg^{-1}$

Tab. 3 – Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
$T_{sp,vys}$	Teplota spalin na výstupu z ohniště	$^{\circ}C$
$M$	Součinitel zohledňující průběh teplot v ohništi	-
$x_{pl}$	Poloha maximální teploty plamene	-
$B_O$	Boltzmanovo číslo	-
$\varphi$	Součinitel uchování tepla	-
$\psi$	Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn	-
$O_{sp} * C$	Celkové střední měrné teplo spalin	$kJ * kg^{-1}$
$I_u$	Užitečné teplo uvolněné v ohništi	$kJ * kg^{-1}$
$a_O$	Stupeň černosti ohniště	-
$R$	Plocha hořící vrstvy paliva na roštu	$m^2$
$s$	Účinná tloušťka sálové vrstvy	$m$
$\mu_{PK}$	Koncentrace popele ve spalinách	$kg / kg$
$G_S$	Hmotnost spalin	$kg / kg$
$k_S$	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny	-
$r_{H_2O}$	Objemový podíl tříatomových plynů $r_{H_2O}$ ve spalinách	-
$r_{RO_2}$	Objemový podíl tříatomových plynů $r_{RO_2}$ ve spalinách	-
$r_S$	Celkový objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách	-
$p_S$	Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách	$MPa$
$k_p$	Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi	-
$k * p * s$	Optická hustota plamene	-
$a_{pl}$	Efektivní stupeň černosti plamene	-
$Q_{SK}$	Teplo předané do teplosměnných ploch z jednoho kg paliva	$kJ / kg_{pal}$
$Q_V$	Teplo předané do teplosměnných ploch z celkového paliva	$kW$
$m_p^{12}$	Množství vyrobené páry	$t / h$

Tab. 4 – Seznam použitých značek a symbolů

# Úvod

Téma této diplomové práce je „Spalovací komora pro Flexibilní energetický systém“. V mé práci se věnuji přehledu používaných a existujících variant roštů pro parní kotle. Zjednodušeně popisuji základní princip činnosti flexibilního energetického systému. Uvádím výhody a nevýhody jednotlivých roštů pro parní kotle. Následně se budu věnovat výpočtu stechiometrie spalování na základě zadaných parametrů. Stanovím účinnost kotle. Navrhnou schéma na straně voda – pára a popíšu jej. Vypočtu teplotu na konci spalovací komory a množství vyrobené páry. Nakonec zpracuji výpočtový projekt spalovací komory, čímž se myslí výkres kotle a řešení jeho teplotních dilatací.

## Vypracování

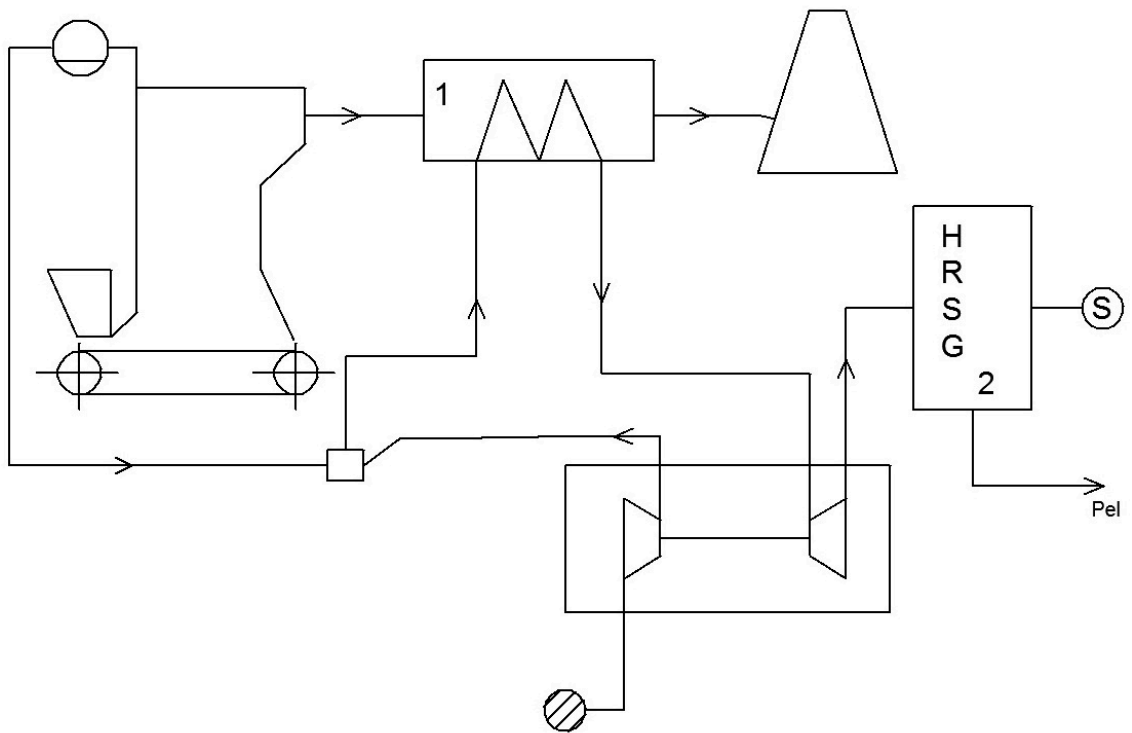
V dnešní době je nutno zajistit všem obyvatelům po celém světě maximum energie pro jejich potřebu při dodržení pravidel týkajících se ochrany životního prostředí. Mezi tato pravidla patří hlavně oxidy síry, dusíku, uhlíku a tuhé znečišťující látky. Je nutno dosahovat co nejvyšší účinnosti transformace primární energie paliva na energii elektrickou a tepelnou. Pro transformaci energií můžeme použít buď spalování, nebo zplyňování.

Postupem času se technologie zlepšily natolik, že jsme schopni použít různá zařízení pro spalování různých druhů paliv (tuhé – uhlí, biomasa, odpady a také kapalné a plynné). Při spalování uhlí můžeme použít zařízení typu rošt, práškové ohniště, fluidní ohniště (bublínková fluidní vrstva, cirkulující fluidní vrstva) a jiné. Tato zařízení mají vysokou spolehlivost a vysokou účinnost transformace energií. Čím vyšší celkovou účinnost zajistíme, tím nižší bude jak spotřeba paliva, tak nižší produkce škodlivin (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, TZL). Snižování produkce CO<sub>2</sub> je velmi žádáno, neboť technologie pro zachycení a ukládání CO<sub>2</sub> vyžaduje značnou spotřebu energie. Proto kdybychom se snažili dosahovat co nejvyšší celkové účinnosti zařízení a následně odečetli energie, které musíme vložit do takovýchto úprav, by značně znehodnotily celý proces a veškeré snažení by bylo zbytečné.

# 1. Flexibilní energetický systém

Jedna z možností zvýšení celkové účinnosti zařízení představuje FES – flexibilní energetický systém, který využívá Rankin-Clausiova parního cyklu v kombinaci s Braytonovým cyklem pro transformaci primární energie tuhých paliv na energii elektrickou a tepelnou. Jedná se o oběh, který pracuje s plynovou turbínou s nepřímým ohřevem pracovní látky - parovodní směsí (směs vzduchu a vodní páry). Jako palivo pro FES je možno použít tuhá paliva – uhlí a biomasa, nebo plynná a kapalná paliva. My se budeme zabývat spalováním černého uhlí. Pro spálení uhlí je nutno použít chlazenou spalovací komoru, sestavenou z membránových stěn zapojených jako výparník s přirozenou cirkulací. Teplo se uvolní a předá ve spalovací komoře vodě, z které se poté vytvoří sytá pára. Ohniště můžeme použít práškové, fluidní či roštové. Po spálení paliva a předání tepla do membránových stěn proudí spaliny dál do elektrostatického filtru, který zbaví spaliny od tuhých znečišťujících látek, dále spaliny proudí do odsiřovacího zařízení a následně do komína.

V praxi to pak vypadá takto – černé uhlí spalujeme na roštu a vyprodukované spaliny (~1100°C) proudí ze spalovací komory dále a předávají své teplo ohříváku parovzduchové směsi (1). Parovzduchová směs vznikne míšením vzduchu z kompresoru plynové turbíny s parou, vzniklou ve výparníku. Tato směs se ohřívá v již zmiňovaném ohříváku parovzduchové směsi na teplotu kolem 800°C. Takto ohřátou parovzduchovou směs necháme vyexpendovat v plynové turbíně a poté ji pustíme do spalínového kotle (2), který využívá Rankin-Clausiova parního oběhu. [1]

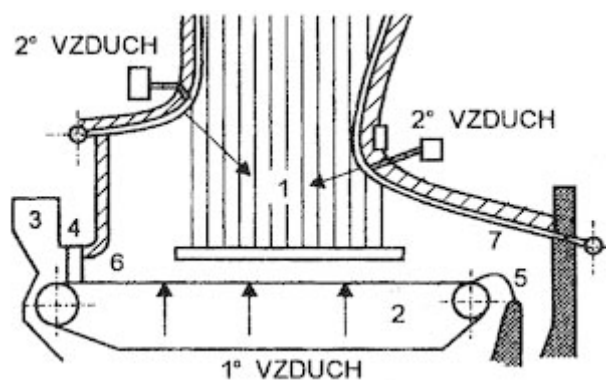


Obr. 1 – Zjednodušené schéma FES dle [1]

## 2. Roštová ohniště

Nyní se budeme věnovat pouze kotlům s roštovým ohništěm. Tyto kotle dosahují teplot kolem 1300°C a přebytek spalovacího vzduchu ve spalovací komoře je většinou 1,3-1,4. Používají se pro velký rozsah výkonů – od 1-150 MWt.

Parní kotel je soubor energetických zařízení vhodně za sebou zařazených v jeden celek, sloužící k výrobě páry o vyšším tlaku, než je tlak atmosférický. Spalování paliv na pevném či mechanickém roštu patří v dnešní době k nejjednodušším principům přeměny chemické energie paliva na tepelnou energii. Na obr. 2 můžeme vidět řez roštovým ohništěm.



Obr. 2 – Základní části roštového ohniště dle [2]

1 - ohniště, 2 - rošt, 3 - násypka paliva, 4 - hradítko, 5 - škvárová výsypka, 6 - přední klenba, 7 – zadní klenba.

Palivo, které dopadá ze zásobníku paliva na rošt, se nejprve musí vysušit od povrchových a ostatních vod ohřátím na příslušnou teplotu sušení, která bývá kolem 120 stupňů. Při vysušení paliva se z něj uvolňuje prchavá hořlavina, která se dalším zahříváním zapálí a umožní zapálení zbylého fixního uhlíku. Při vyhoření veškeré hořlaviny se musí tuhý zbytek (škvára, struska) dostat pryč z roštu, vychladit se a následně dopravit do škvárové výsypky.

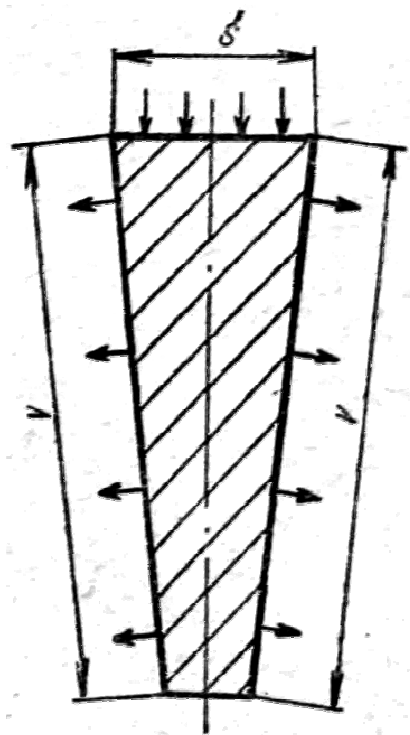
Roštem nazýváme plochu, na které spalujeme palivo. Při spalování je palivo buď rozvrstveno, nebo může být unášeno posuvem roštu – v závislosti na volbě roštu. Existují rošty rovinné, mechanické pásové a rošty přesuvné – prohrabovací. Z roštnic skládáme roštovou plochu, která mezi roštnicemi obsahuje mezery. Mezerami proudí vzduch ke

spalované vrstvě, který je nezbytný pro její spálení. Mezery, o kterých hovoříme, je nutno udržovat čisté, neboť při ucpání bychom přivedli méně spalovacího vzduchu a mohlo by dojít k tvorbě nežádoucích látek (CO, NO<sub>x</sub>), popřípadě k podstechiometrickému spalování. Mohlo by se také stát, že by se ucpaly mezery jen na některých místech a docházelo by k nerovnoměrnému odhořívání paliva. Proudící vzduch má také další funkci, a to chlazení roštu. Horní plocha roštnice je intenzivně zahřívána teplem ze spalovaného paliva, bok a spodní část je chlazena proudícím spalovacím vzduchem. Na životnost roštu má proto vliv několik faktorů, mezi které patří zejména tvar roštu (roštnice) a její zvolený materiál, vlastnosti paliva (výhřevnost, spékavost), různá tepelná zatížení, množství a rychlost proudícího vzduchu roštnicemi atd.

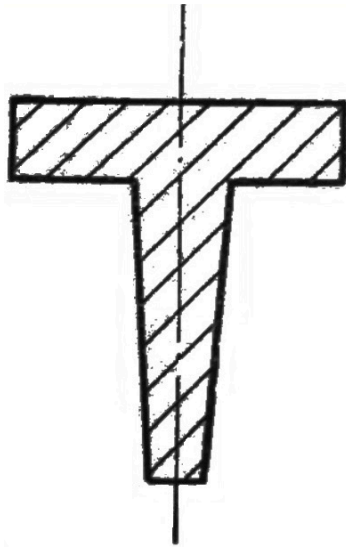
Roštnice mohou mít různé průřezy. Mezi základní rozdělení patří průřezy stupňové, lichoběžníkové zužující a roštnice ve tvaru písmene „T“. Stupňová roštnice je nízká. Poměr mezi plochami přijímanými a odváděnými teplo je zhruba 1:1. Z důvodu velké mezery mezi roštnicemi je rychlost proudícího vzduchu malá – to vede ke snížené životnosti roštnic – není možno roštnice dochladiť. Proto je nutno s takovým typem roštnic uvažovat pouze v případě, že spalované palivo má malou výhřevnost. Průřez lichoběžníkové, zužující roštnice je vidět na obr. 3. Tato roštnice je shora vystavena teplotě spalovací komory, zatímco boky jsou chlazeny přiváděným spalovacím vzduchem. Chladicí poměr této roštnice můžeme stanovit jako podíl šířky horního dílu ku dvojnásobku výšky roštnice (dva boky). V tomto případě je poměr předaného a odvedeného tepla na první pohled jiný, než u roštnice stupňové. Tato roštnice má mnohem větší životnost. Ideální by bylo šířku mezi roštnicemi neustále snižovat a výšku zvyšovat, ale je nutno uvažovat i s teplotními rozdíly. Proto musíme volit optimální podíl mezi výškou a šířkou. Roštnice ve tvaru „T“ má širokou plochu prodlouženou vertikálním rozváděcím žebrem, viz obr. 4. Chladicí poměr je opět šířka k dvojnásobku výšky. U tohoto profilu je problém s výběrem materiálu. Pokud použijeme žáruvzdornější materiál, který je křehčí, dostaneme se do určitých problémů. Tento profil totiž vykazuje velké vnitřní pnutí. Je vhodné volit optimální materiály a také dodržet šířku mezi roštnicemi pro proudící vzduch (čím větší mezera, tím nižší rychlost vzduchu). Je dobré zvolit i optimální palivo a počítat s propadem. Pro jednoduchost si uvedeme obr. 5, kde lze vidět závislost teploty spalin na výšce roštnice. Životnost roštnic lze zvyšovat určitými postupy, např. zušlechťováním povrchu, či změnou chemického složení litiny (3-4% uhlíku). Lze také využít i slitin s vyšším obsahem chromu (15%), ale tato varianta je značně drahá. Zvýšit životnost lze i rozdílným způsobem lití, nebo takové pokovením roštnice hliníkem nebo



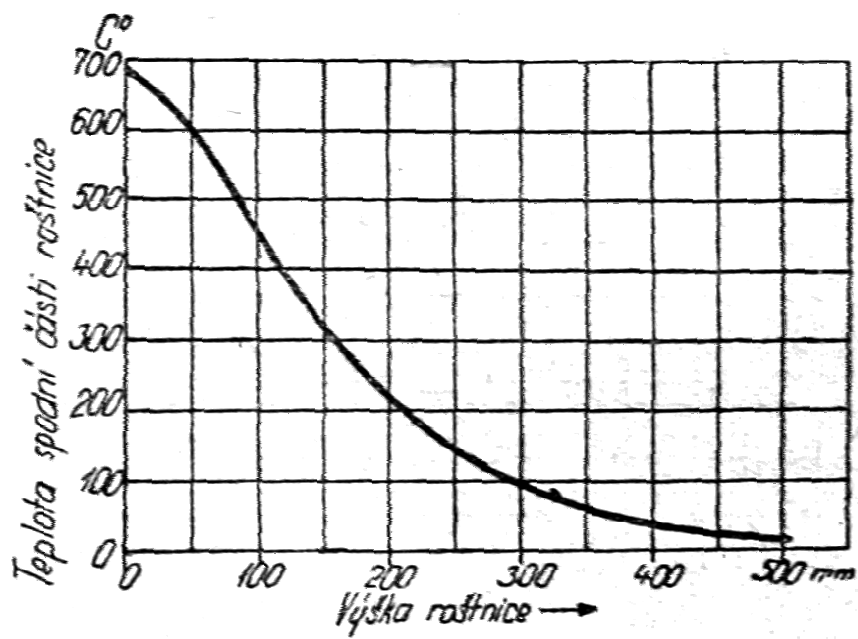
chromem. Všechny tyto varianty zvyšování účinnosti jsou výhodné, nicméně velice finančně nákladné. Pokud bychom ale správně nastavili chladicí poměr roštu a zvolíme správné palivo, nemělo by k nadměrnému opotřebení, spékání paliva ani ke žhavení roštnic docházet.



*Obr. 3 – Průřez zužující se roštnice dle [3]*



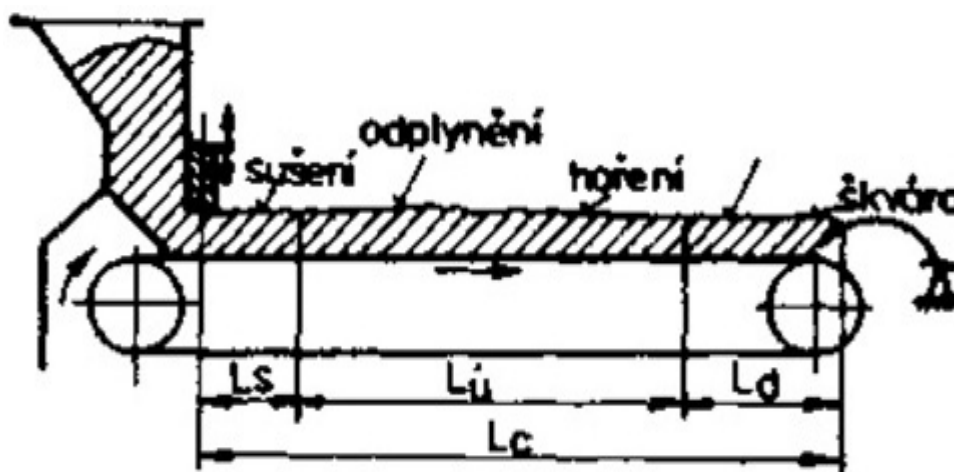
Obr. 4 - Průřez roštnice ve tvaru „T“ dle [3]



Obr. 5 - Křivka změny teploty roštnice dle měnící se výšce roštnice a stálé rychlosti vzduchu dle [3]

## 2.1 Účinná plocha roštu

Jak již bylo řečeno, rošt kotle neslouží pouze k transformaci chemické energie uložené v palivu na entalpii spalin, ale slouží také k vysušení paliva, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a také dokonalé vyhoření. Účinná plocha roštu slouží pouze k uvolnění tepla obsaženého v palivu a nezapočítává se do ní ostatní procesy, psané výše. Proto čím vyšší je obsah vody v palivu, tím klesá účinná plocha roštu a opačně. Také čím vyšší bude obsah vody v palivu, tím nižší spalovací teploty dosáhneme. Proto je dobré používat vhodná paliva, přizpůsobená typu a délce roštu. Pro ukázkou uvádím obr. 6, na kterém lze vidět celkovou délku roštu „ $L_c$ “, účinnou délku roštu „ $L_u$ “, sušící délku roštu „ $L_s$ “ a také dohořivací délku roštu „ $L_d$ “.



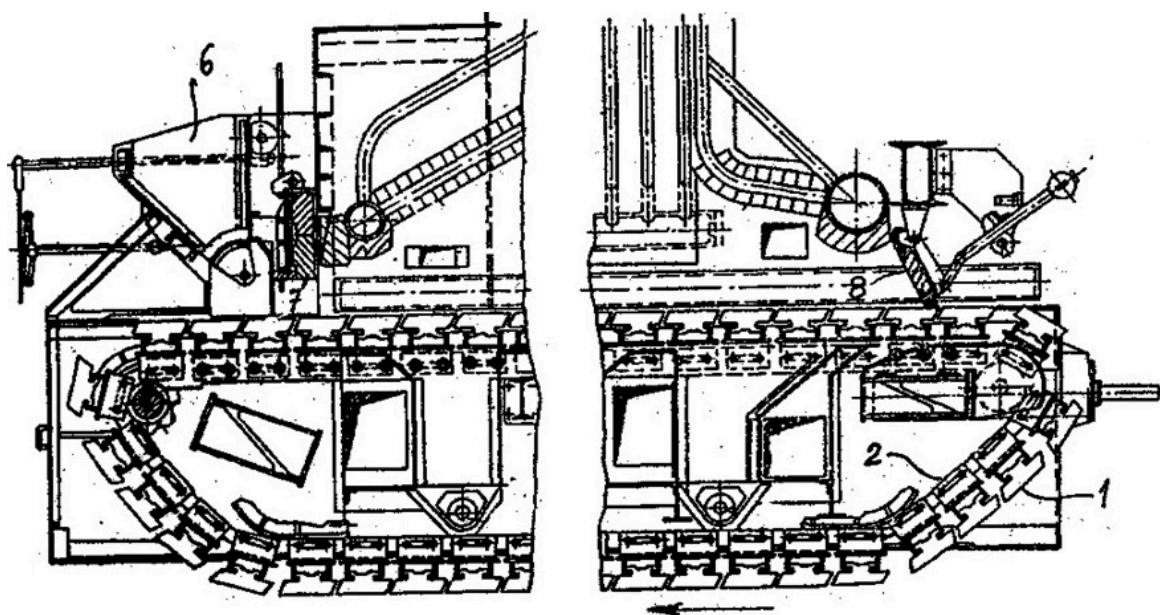
Obr. 6 – Účinná plocha roštu dle [5]

## 2.2 Druhy roštů

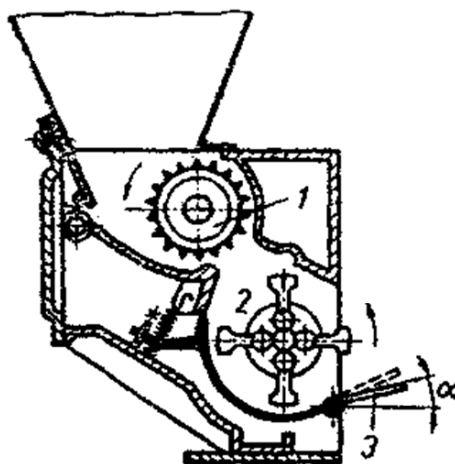
Rošty rovinné – mohou mít různé tvary roštnic, jak bylo řečeno výše (jednoduché, lichoběžníkové). Na těchto roštích je možno spalovat pouze tříděné uhlí. Mezera mezi roštnicemi se tomuto palivu přizpůsobuje, aby palivo nepropadávalo. Palivo, které je v zásobníku, dopadá na již spalovanou, rozžhavenou vrstvu na roštu. Proto lze spalovat paliva špatně zápalná. Pod rošty je vháněn spalovací vzduch a jednotlivé roštnice se navzájem překrývají. Tento princip je uplatněn takřka u většiny roštů, nicméně trochu se liší. Rošt typu „Geifa“ není vodorovný, zatímco typ „rovinný“ je naprosto vodorovný. V praxi to pak vypadá takto – velké kusy uhlí zůstanou na vodorovné ploše roštu a jemná frakce uhlí společně s popelem zůstane ležet v navzájem překrývajících se roštnicích. Díky tomuto principu nedochází k propadu paliva pod rošt. Je potřeba si ale dát pozor na spékání paliva, díky kterému by se ucpal přívod vzduchu. Tento způsob využívá pevného roštu a zbytky po spalování se odstraňují manuálně.

Pásové rošty – jedná se o nejstarší konstrukci mechanického roštu. Je to nejlepší a nejrozšířenější provedení roštů. Rošt může být řetězový. V tomto případě se jedná o nekonečně dlouhý řetěz složený z roštnic, které unášejí palivo. Tento rošt snáší značné mechanické a tepelné zatížení. Zásadní změnou oproti klasickým roštům byla absence foukání spodního spalovacího vzduchu pod roštnicemi. U pásových roštů se užívaly velice široké mezery, proto bylo nutné používat uhlí o větší granulometrii. Nyní je tento typ nahrazen typem roštu s pásmovaným dělením. U tohoto typu je výhoda možnosti foukání spalovacího vzduchu pro určité úseky, kde je potřeba lepšího vyhoření paliva. Tento typ roštu má tažný řetěz oddělen od roštnice, a proto roštnice není namáhána mechanicky na tah. Díky svému tvaru jsou určeny pro spalování paliv, která mají nejvyšší výhřevnost. Zde probíhá vynášení zbytků po spalování mechanicky. Jedná se o nejpoužívanější rošt v dnešní době společně s rošty přesuvnými a vratisuvnými. U tohoto typu roštu probíhá spalování na jedné třetině pásu. Zbývající dvě třetiny tvoří ovinutí předního a zadního hřídele a je mimo spalovací proces. Tato výhoda znamená, že třetina roštu je tepelně namáhána a zbylé dvě třetiny se chladí a čistí vypadáváním zbytků popela. Velkou výhodou je jednoduchost roštu – snadná výměna části roštu, dokonce i za provozu. Mezi nevýhody tohoto roštu patří nároky na lepší palivo, protože není prohrabováno, nesmí se spékat a musí dokonale vyhořet. Dokonalé vyhoření ale není možno dodržet, protože palivo má většinou velmi různorodou granulometrii.

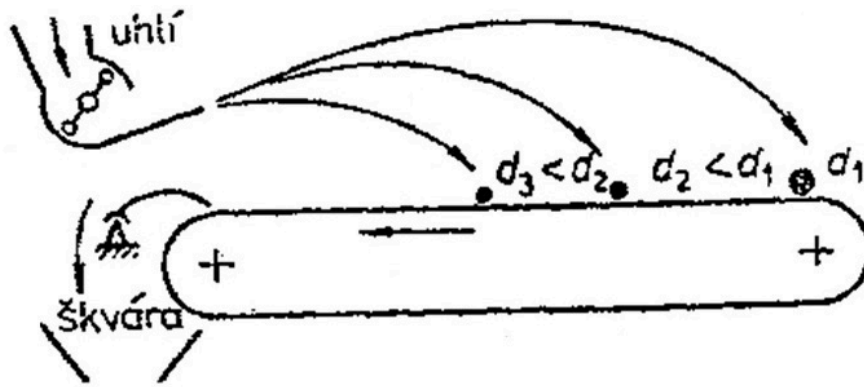
Jak již bylo řečeno, palivo padá ze zásobníku na roštový pás. Toto palivo je unášeno ve směru pohybu roštu. Vrstva paliva je regulována výškou hradítka a takto zregulovaná výška paliva zůstává v klidu a nic ji nekypří. Rychlost vyhoření, podíl nespáleného uhlíku a množství popela bude záviset na jakosti paliva – tzn. výhřevnost, granulometrie, obsah vody a popela, obsah hořlaviny (prchavé a fixní). Rychlostí spalování rozumíme množství spáleného paliva za hodinu. Je-li palivo nižší jakosti, roste podíl popele. Stoupá proto množství nedopalu a zároveň se snižuje rychlost spalování. Pásový rošt nemusí využívat pouze klasického sypání paliva z výsypky na rošt, ale může mít i mechanický nebo pneumatický pohazovač umístěný pod výsypkou, viz. obr. 9 a obr. 10.



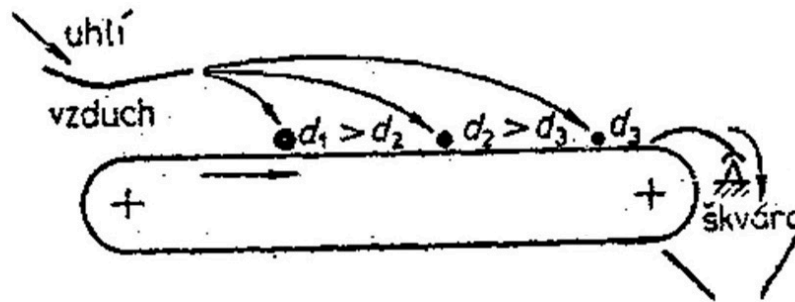
Obr. 7 – Pásový rošt bez pohazovače paliva dle [5]



Obr. 8 – Mechanický pohazovač dle [5]



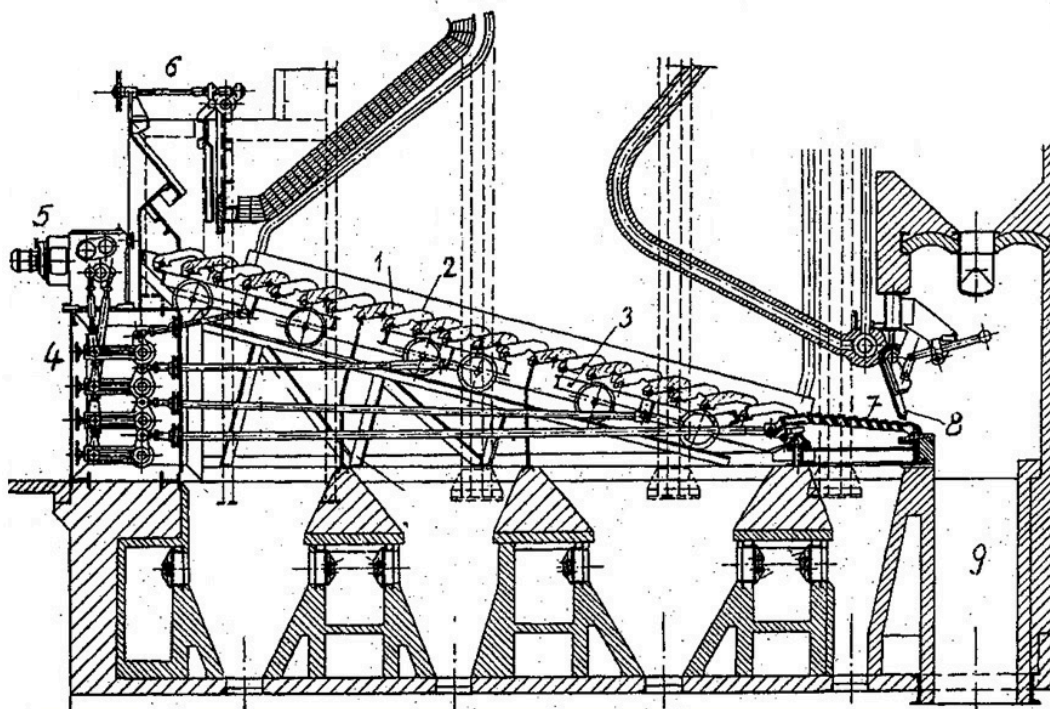
Obr. 9 – Mechanické pohazování paliva na pásový rošt



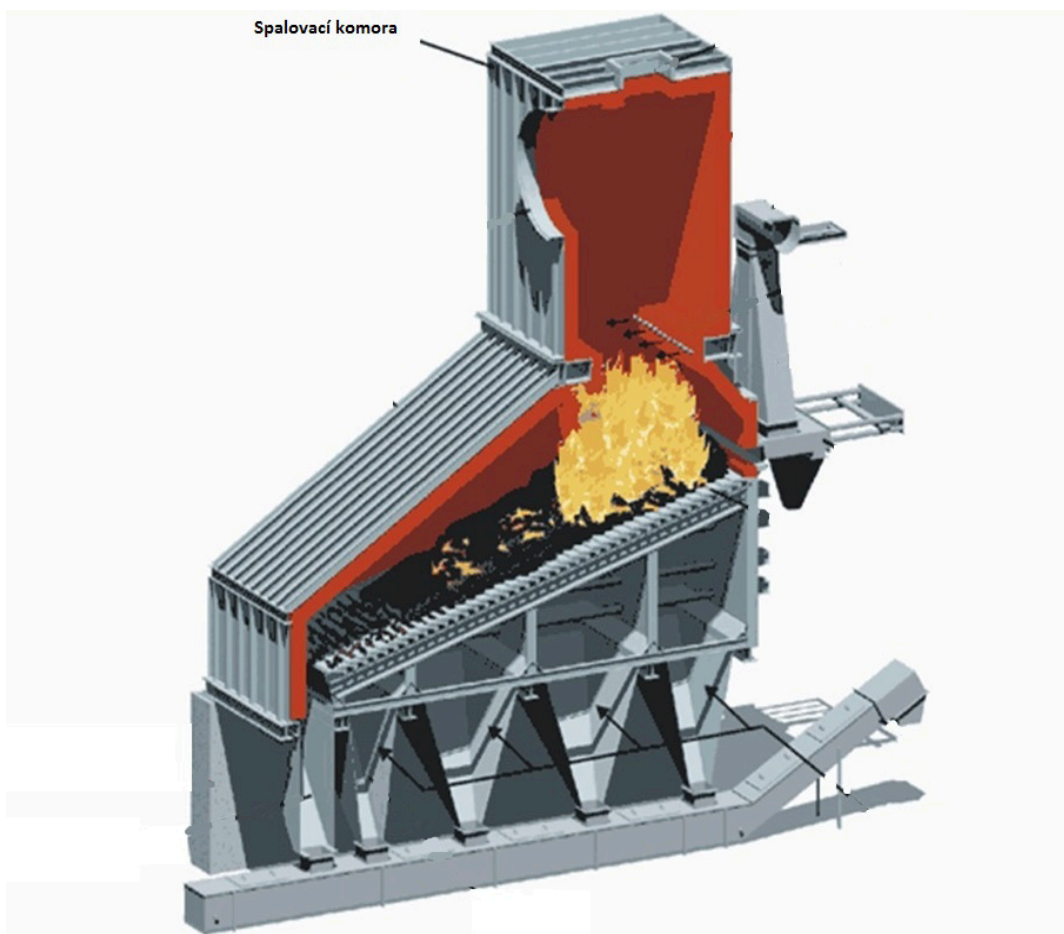
Obr. 10 – Pneumatické pohazování paliva na pásový rošt

Prohrabovací rošty – jsou primárně určeny pro spalování paliv, které potřebují neustálé prohrabování, např. paliva s vysokým obsahem popele. Mohou to být buď rošty přesuvné, vratné nebo kaskádové. Jediná výhoda těchto roštů je trvalé prohrabování spalovací vrstvy, přičemž se velké kusy paliva drtí a spalování probíhá intenzivněji. Mezi nevýhody tohoto roštu patří zejména trvalé vystavení roštnic spalovací teplotě a nadměrnému opotřebení opálením roštnic. Pokud by došlo k destrukci roštnice, museli bychom kotel odstavit. Výměna totiž není možná za provozu, tak jako tomu bylo u pásového roštu. Zároveň zde dochází k ucpávání mezer mezi roštnicemi, což vede ke spékání paliva a také k nedostatečnému chlazení roštnic.

Přesuvný rošt – tento rošt je složen z několika roštnic. Jedná se o kombinaci pohyblivých a nepohyblivých řad roštnic, které musí mít dokonale těsné stěny. Každá z těchto roštnic má svůj pohon, který je zajištěn z boku roštnice. Přívod spalovacího vzduchu je zajištěn do několika pásem roštu. Každé pásmo může být samostatně regulováno a navzájem na sebe nemají vliv. Propad u tohoto typu roštu závisí na vzdálenosti mezi roštnicemi (horizontální a vertikální) a také na granulometrii paliva. V praxi se dávalo do prvního pásma méně spalovacího vzduchu, což vedlo ke snížení vzdálenosti mezi roštnicemi a menšímu propadu. Tento propad se vrací do spalovací komory za pomoci pneumatické dopravy. Malá mezera se mohla dát z důvodu sušení a odplynění v prvním pásmu roštu. V ostatních pásmech se mezera zvětšila, aby mohl případný popel propadávat a zajistilo se více spalovacího vzduchu. Roštnice u tohoto typu roštu jsou uloženy na tzv. vozících, které jsou uloženy za sebou a mohou být s přímočarým, vratným nebo výkyvným pohybem.



*Obr. 11 – Přesuvný rošt dle [5]*

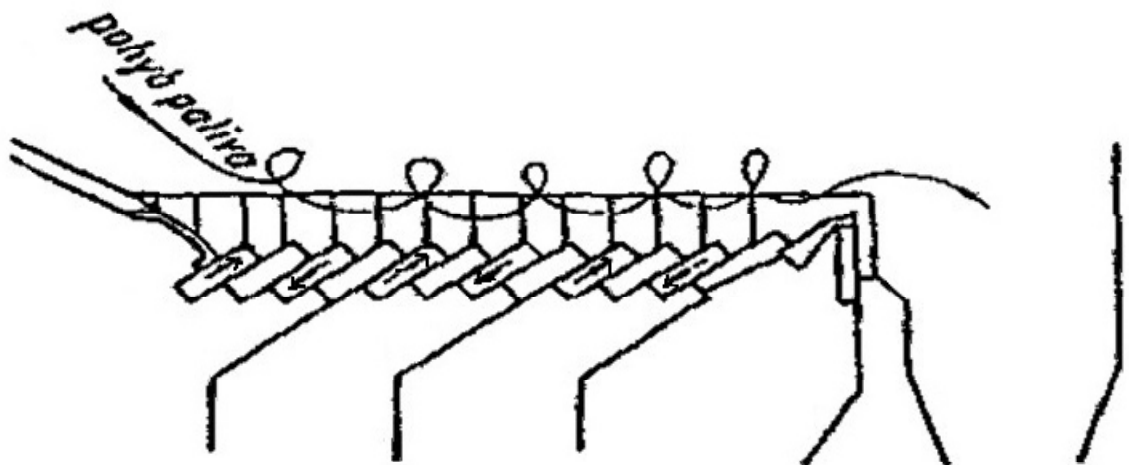


*Obr. 12 – Schéma kotle s přesuvným roštem dle [5]*



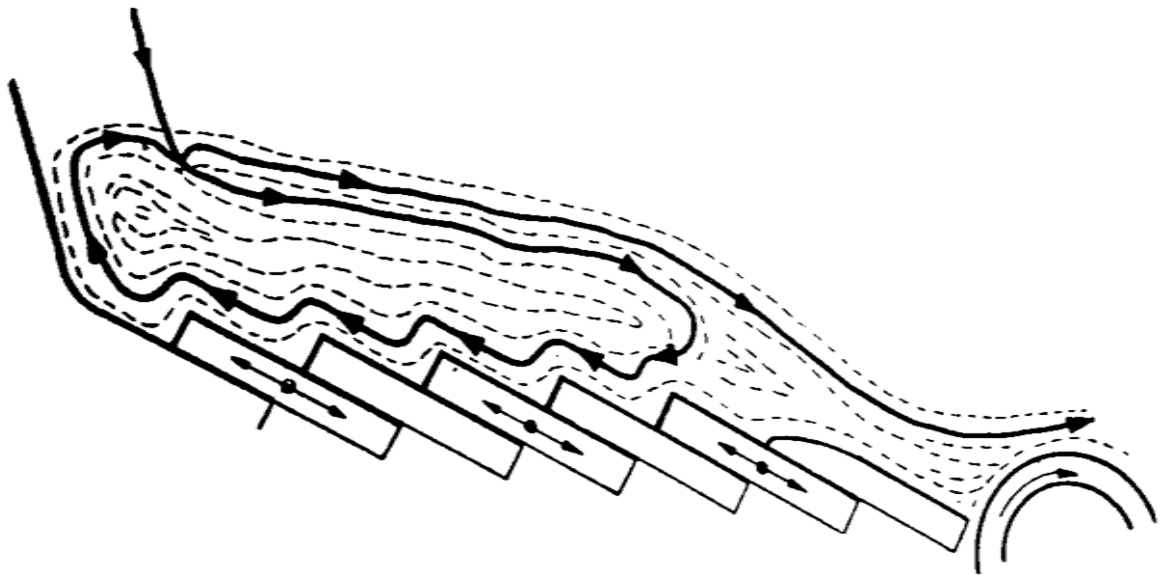
Kaskádový rošt – jedná se o prohrabovací rošt složený kombinací pohyblivých a nepohyblivých řad roštnic, které jsou buď nakloněny pod úhlem 15°, nebo jsou vodorovné.

Princip je následovný – palivo padá ze zásobníku na rošt. Jednotlivé roštnice jsou v pohybu proti sobě pod úhlem, což vytváří „vlnovitý“ tvar. Díky tomuto principu je palivo neustále prohrabováno a mícháno s palivem novým. Takto se zrychlí spalování alepší se vyhoření paliva – vhodné použití paliva s různou granulometrií. Často se používá kombinace kaskádového roštu s roštem rovinným. Na rovinném roštu se palivo vysuší a odplyní, což má za následek přesun již hořícího paliva na rošt kaskádový, který má za úkol zrychlit spalování a zlepšit intenzitu spalování prohrabováním. Na konci spalování je nutno zajistit vychlazení strusky.



Obr. 13 – Schéma pohybu paliva na kaskádovém roštu dle [3]

Vrativý rošt – pro spalování paliv s vysokým obsahem popele a pro těžko zápalná paliva. Princip funkce je takový, že se palivo zapaluje zespod roštu a nově přiváděné palivo se sype na již hořící vrstvu – teplo přiváděno jednak sáláním ze spalovací komory a jednak z již hořící vrstvy paliva, proto lze využít i pro paliva hůře zapalovatelná. Navíc při pohybu roštu se palivo převrací a sesunuje. Je promícháváno palivo nové s již hořícím, to je důvod možnosti použití horších paliv (vysoký obsah vody, těžko zápalná paliva z důvodu malého obsahu prchavé hořlaviny v palivu).



Obr. 14 – Princip pohybu paliva na vrativém roštu typu „Martin“ dle [3]

### 3. Zadání

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem doplnil tyto hodnoty:

Přebytek vzduchu za kotlem:  $\alpha=1,5$

Přebytek vzduchu za spalovací komorou:  $\alpha=1,4$

Teplota za kotlem:  $t=160^{\circ}\text{C}$

Parní výkon kotle:  $P=100\text{t/h}$

Teplota napájecí vody:  $t_{nv}=105^{\circ}\text{C}$

Uvažuji bezpropadový rošt, proto s propadem paliva ve výpočtu nepočítám. Vzduch je ohříván spalinami na  $160^{\circ}\text{C}$ .

$X_{str}=75\%$

$X_{pop}=25\%$

$C_{str}=16\%$

$K_s=5$

Pro mé výpočty budu používat ostravské uhlí, které má následující parametry (v surovém stavu):

$C^r=60,22\%$

$H^r=3,59\%$

$S^r=0,37\%$

$N^r=0,85\%$

$O^r=4,83\%$

$W^r=5,58\%$

$A^r=23,67\%$

$A^d=25,19\%$

$Qi^r=23,78643\text{MJ}$

## 4. Výpočet

Výpočet výhřevnosti paliva dle zadaných parametrů:

$$Q_i^r = 339 * C^r + 1030 * H^r - 109 * (O^r - S^r_{spal}) - 24,5 * W^r = 339 * 60,22 + 1030 * 3,59 - 109 * (4,83 - 0,37) - 24,5 * 5,58 = 23,626MJ$$

Dříve, než začnu počítat stechiometrii a stanovovat množství vzduchu a spalín, je nutno přepočítat výhřevnost paliva pomocí Mendělejevova vztahu:

$$Q_i^r = 339 * C^r + 1030 * H^r - 109 * (O^r - S^r_{spal}) - 24,5 * W^r = 339 * 60,9 + 1030 * 3,59 - 109 * (4,15 - 0,37) - 24,5 * 5,58 = 23,794MJ$$

Takto stanovená výhřevnost se musí přibližně rovnat výhřevnosti stanovené kalorimetricky.

$A^d$  je větší, než 25%, proto vypočtená výhřevnost nesmí být menší, než stanovená kalorimetricky a zároveň nesmí být větší o 840 kJ/kg. Tuto podmínku bych nesplnil, proto musím upravit rozbor paliva, přičemž ale musím zachovat hodnoty síry a dusíku. Proto jsem upravit hodnotu uhlíku a kyslíku.

Nový prvkový rozbor by mohl vypadat takto:

$$C^r = 60,9\%$$

$$H^r = 3,59\%$$

$$S^r = 0,37\%$$

$$N^r = 0,85\%$$

$$O^r = 4,15\%$$

Nyní je nutno spočítat podmínku poměrného objemu tříatomových plynů:

$$\beta = \frac{2,37 * (H^r - 0,125 * O^r)}{C^r - 0,375 * S^r} = \frac{2,37 * (3,59 - 0,125 * 4,15)}{60,9 - 0,375 * 0,37} = 0,12$$

$$\omega_{RO2MAX} = \frac{21}{1 + \beta} = 18,75$$

Pro černá uhlí musí hodnota být mezi 18,4-19,00 z čehož vyplývá, že podmínku jsem splnil. Nyní se můžu pustit do samotné stechiometrie.

## 4.1 Stechiometrické výpočty

Cílem stochiometrických výpočtů je stanovení množství potřebného vzduchu ke spálení jednoho kilogramu paliva, dále stanovení objemu spalin vzniklých při spalování. Mohou nastat dva stavy: dokonalé a nedokonalé spalování. Při dokonalém spalování by musela dokonale vyhořet veškerá hořlavina obsažená v palivu – nebyl by žádný přebytek vzduchu. Opačný případ – nedokonalé spalování by znamenalo, že by pro hořlavinu obsaženou v palivu byl nedostatek kyslíku na dokonalé vyhoření a docházelo by k tvorbě CO. Přebytek vzduchu v mém případě je zadán a činí  $\alpha=1,5$ . Objemy médií spočítané následujícími vztahy značím metry kubickými normálními na jeden kilogram paliva jak pro suchý, tak pro vlhký stav.

Minimální množství kyslíku, nutné ke spálení jednoho kilogramu paliva (kyslík odečítám, protože je již vázán v hořlavině):

$$V_{O_2,t} = \frac{22,26}{12,01} * C^r + \frac{21,89}{32,06} * S^r + \frac{22,4}{4,032} * H^r - \frac{22,4}{32} * O^r$$
$$V_{O_2,t} = \frac{22,26}{12,01} * 0,609 + \frac{21,89}{32,06} * 0,0037 + \frac{22,4}{32} * 0,0359 - \frac{22,4}{32} * 0,0415$$
$$V_{O_2,t} = 1,127 m^3_n / kg_{pal}$$

Minimální množství suchého vzduchu nutného pro dokonalé spálení jednoho kilogramu paliva:

$$V_{vz,t}^S = \frac{V_{O_2,t}}{0,2103} = 5,361 m^3_n / kg$$

Součinitel zvětšení objemu vzduchu vlivem vlhkosti:

$$\chi = 1 + \frac{\varphi}{100} * \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} * p''} = 1 + \frac{60}{100} * \frac{0,002337}{0,101325 - \frac{60}{100} * 0,002337} = 1,014$$

kde  $\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu, která činí 60%;  $p''$  je parciální tlak vodní páry pro teplotu nasávanou do spalovací komory, která je 20°C a  $p_c$  je tlak vzduchu.

Teplotě vzduchu 20°C odpovídá parciální tlak  $p''=0,0023368$  dle [4].

Minimální množství vlhkého vzduchu nutného pro dokonalé spálení jednoho kilogramu paliva:

$$V_{vz,t}^V = V_{vz,t}^S * \chi = 5,361 * 1,014 = 5,436 m_n^3 / kg$$

Skutečný objem suchého vzduchu stanovím jako:

$$V_{vz,SK}^S = n * V_{vz,t}^S = 1,5 * 5,361 = 8,042 m_n^3 / kg_{pal}$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu je:

$$V_{vz,SK}^V = n * V_{vz,t}^V = 1,5 * 5,436 = 8,154 m_n^3 / kg_{pal}$$

Objem oxidu uhličitého:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} * C^r = \frac{22,26}{12,01} * 0,609 = 1,129 m_n^3 / kg$$

Objem oxidu siřičitého:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} * S^r = \frac{21,89}{32,06} * 0,0037 = 0,00253 m_n^3 / kg$$

Objem dusíku:

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} * N^r + 0,79 * V_{vz,t}^S = \frac{22,4}{28} * 0,0085 + 0,79 * 5,361 = 4,242 m_n^3 / kg$$

Objem argonu společně se vzácnými plyny obsaženého ve vzduchu:

$$V_{AR} = 0,0092 * V_{vz,t}^S = 0,0092 * 5,361 = 0,049 m_n^3 / kg$$

Objem kyslíku:

$$V_{O_2} = 0,21 * (n - 1) * V_{vz,t}^S = 0,21 * (1,5 - 1) * 5,361 = 0,563 m_n^3 / kg$$

Objem vodní páry:

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} * H^r + \frac{22,4}{18} * W^r + (\chi - 1) * V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{2} * 0,0359 + \frac{22,4}{18} * 0,0558 + (0,014) * 8,042 = 0,584 m_n^3 / kg$$

Objem vlhkých spalin:

$$V_{sp,sk}^v = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{AR} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 1,129 + 0,00253 + 4,242 + 0,049 + 0,584 + 0,563 = 6,57 m_n^3 / kg$$

Objem suchých spalin:

$$V_{sp,sk}^s = V_{sp,sk}^v - V_{H_2O} = 6,57 - 0,584 = 5,986 m_n^3 / kg$$

Objem vlhkých spalin musím přepočítat dle teploty za kotlem, která činí 160°C:

$$V_{sp,c}^v = V_{sp,sk}^v * \frac{273,15 + t_k}{273,15} * \frac{0,101325}{p_s} = 6,57 * \frac{273,15 + 160}{273,15} * \frac{0,101325}{0,101325} = 10,4 m_n^3 / kg$$

Koncentrace suchých spalin:

$$\omega_{SS,CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,sk}^s} * 100 = \frac{1,129}{5,986} * 100 = 18,86\%$$

$$\omega_{SS,SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^s} * 100 = \frac{0,00253}{5,986} * 100 = 0,042\%$$

$$\omega_{SS,N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,sk}^s} * 100 = \frac{4,242}{5,986} * 100 = 70,87\%$$

$$\omega_{SS,O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,sk}^s} * 100 = \frac{0,563}{5,986} * 100 = 9,405\%$$

$$\omega_{SS,Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{sp,sk}^s} * 100 = \frac{0,049}{5,986} * 100 = 0,819\%$$

$$\Sigma = 100\%$$

Koncentrace vlhkých spalin:

$$\omega_{VS,CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{1,129}{6,57} * 100 = 17,184\%$$

$$\omega_{VS,SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{0,00253}{6,57} * 100 = 0,039\%$$

$$\omega_{VS,N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{4,242}{6,57} * 100 = 64,57\%$$

$$\omega_{VS,O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{0,563}{6,57} * 100 = 8,569\%$$

$$\omega_{VS,H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{0,584}{6,57} * 100 = 8,889\%$$

$$\omega_{VS,AR} = \frac{V_{AR}}{V_{sp,sk}^V} * 100 = \frac{0,049}{6,57} * 100 = 0,746\%$$

$$\Sigma = 100\%$$

Nyní si musím stanovit měrnou tepelnou kapacitu spalin:

$$C_{pCO_2} = \frac{1,7863 - 1,6996}{200 - 100} * (160 - 100) + 1,6996 = 1,751 kJ * kg^{-1} * K^{-1}$$

$$C_{pSO_2} = \frac{1,9427 - 1,8631}{200 - 100} * (160 - 100) + 1,8631 = 1,911 kJ * kg^{-1} * K^{-1}$$

$$C_{pN_2} = \frac{1,2994 - 1,2951}{200 - 100} * (160 - 100) + 1,2951 = 1,298 kJ * kg^{-1} * K^{-1}$$

$$C_{pH_2O} = \frac{1,5227 - 1,5062}{200 - 100} * (160 - 100) + 1,5062 = 1,516 kJ * kg^{-1} * K^{-1}$$

$$C_{pO_2} = \frac{1,3372 - 1,3193}{200 - 100} * (160 - 100) + 1,3193 = 1,33 kJ * kg^{-1} * K^{-1}$$

$$\begin{aligned} C_{psp} &= C_{pCO_2} * \omega_{CO_2} + C_{pSO_2} * \omega_{SO_2} + C_{pN_2} * \omega_{N_2} + C_{pH_2O} * \omega_{H_2O} + C_{pO_2} * \omega_{O_2} = \\ &= 1,751 * 0,17184 + 1,911 * 0,00039 + 1,298 * 0,6457 + 1,516 * 0,08889 + 1,33 * 0,08569 = \\ &= 1,389 kJ * m^{-3} * K^{-1} \end{aligned}$$



## 4.2 Účinnost kotle

Účinnost kotle se stanovuje dvěma způsoby, a to: přímou a nepřímou metodou.

Pro zjištění účinnosti kotle přímou metodou je nutno znát přesné množství přivedeného paliva a také jeho výhřevnost. Tato varianta je vhodná především pro plynná paliva a nepřipadá v úvahu pro tuhá paliva. Proto stanovím účinnost kotle nepřímou metodou, kde se spočtou všechny ztráty kotle a odečtou se od celku.

Nejprve si ale musím stanovit obsah spalitelných látek ve strusec a popílku podle těchto vztahů:

$$z_0 = \frac{100 * K_s * Q_{nr}}{A^r * Q_{nc}} = \frac{100 * 5 * 23,78643}{23,67 * 32,7} = 15,366\%$$

Hodnota redukované výhřevnosti zůstává stejná, jako výhřevnost kalorimetricky určená, protože uhlí před spalováním nepředehřívám a cizím zdrojem nepředehřívám ani spalovací vzduch.

$$a_s = \frac{C_{str} * X_{str}}{100 - C_{str}} = \frac{16 * 75}{100 - 16} = 14,286\%$$

Hodnotu  $C_{str}$  jsem stanovil z tab. 5-1, str. 64 literatury [4]. Pro roštový kotel, pásový rošt a černé uhlí je tato hodnota 16%.

Nyní můžu stanovit obsah spalitelných látek v popílku:

$$C_{pop} = \frac{100 * (z_0 - a_s)}{x_{pop} + z_0 - a_s} = \frac{100 * (15,366 - 14,286)}{25 + 15,366 - 14,286} = 4,141\%$$

Mechanický nedopal:

$$z_{c, str} = \frac{C_{str}}{1 - C_{str}} * X_{str} * \frac{A^r}{Q_i} * Q_{ci} = \frac{16}{100 - 16} * 0,75 * \frac{0,2367}{23786} * 32600 = 0,0463 = 4,63\%$$

$$z_{c, pop} = \frac{C_{pop}}{1 - C_{pop}} * X_{pop} * \frac{A^r}{Q_i} * Q_{ci} = \frac{4,141}{100 - 4,141} * 0,25 * \frac{0,2367}{23786} * 32600 = 0,0035 = 0,35\%$$

Celkovou ztrátu nedopalem stanovím jako součet nedopalu ve strusce a popílku:

$$z_c = z_{c, str} + z_{c, pop} = 0,0463 + 0,0035 = 0,0498 = 4,98\%$$

Komínová ztráta:

$$z_k = (1 - z_c) * \frac{V_{sp,c}^V * c_{psp} * (t_{sp} - t_0)}{Q_i} = (1 - 0,0498) * \frac{10,4 * 1,389 * (160 - 20)}{23786} = 0,0805 = 8,05\%$$

Ztráta chemickým nedopalem:

$$z_{CO} = \frac{0,2116 * mgCO * V_{sp,sk}^s}{(21 - O_{2REF}) * Q_{ired}} = \frac{0,2116 * 250 * 5,986}{(21 - 6) * 23786} = 0,0008875 = 0,089\%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků se skládá opět z výpočtu ztráty tepla v popílku a ve strusce. Celková tato ztráta se potom skládá ze součtu těchto ztrát.

$$z_{f, str} = \frac{X_{str}}{1 - C_{str}} * C_i * \frac{A^r}{Q_{i, RED}} * t_s = \frac{75}{100 - 16} * 1,01 * \frac{23,67}{23786} * 600 = 0,538\%$$

$$C_i = 0,71 + 0,5 * 10^{-3} * t_s = 0,71 + 0,5 * 10^{-3} * 600 = 1,01$$

Teplotu tuhých zbytků  $t_s$  volím 600°C dle [4] str. 66, měrnou tepelnou kapacitu tuhých zbytků dopočítám dle vztahu výše.

$$z_{f, pop} = \frac{X_{pop}}{1 - C_{pop}} * C_i * \frac{A^r}{Q_{i, RED}} * t_s = \frac{25}{100 - 4,141} * 1,01 * \frac{23,67}{23786} * 600 = 0,157\%$$

$$z_{f, celk} = z_{f, str} + z_{f, pop} = 0,538 + 0,157 = 0,695\%$$

Ztráta sáláním tepla do okolí

Ztráta představuje množství tepla, které sálá z pláště kotle do okolních prostor.

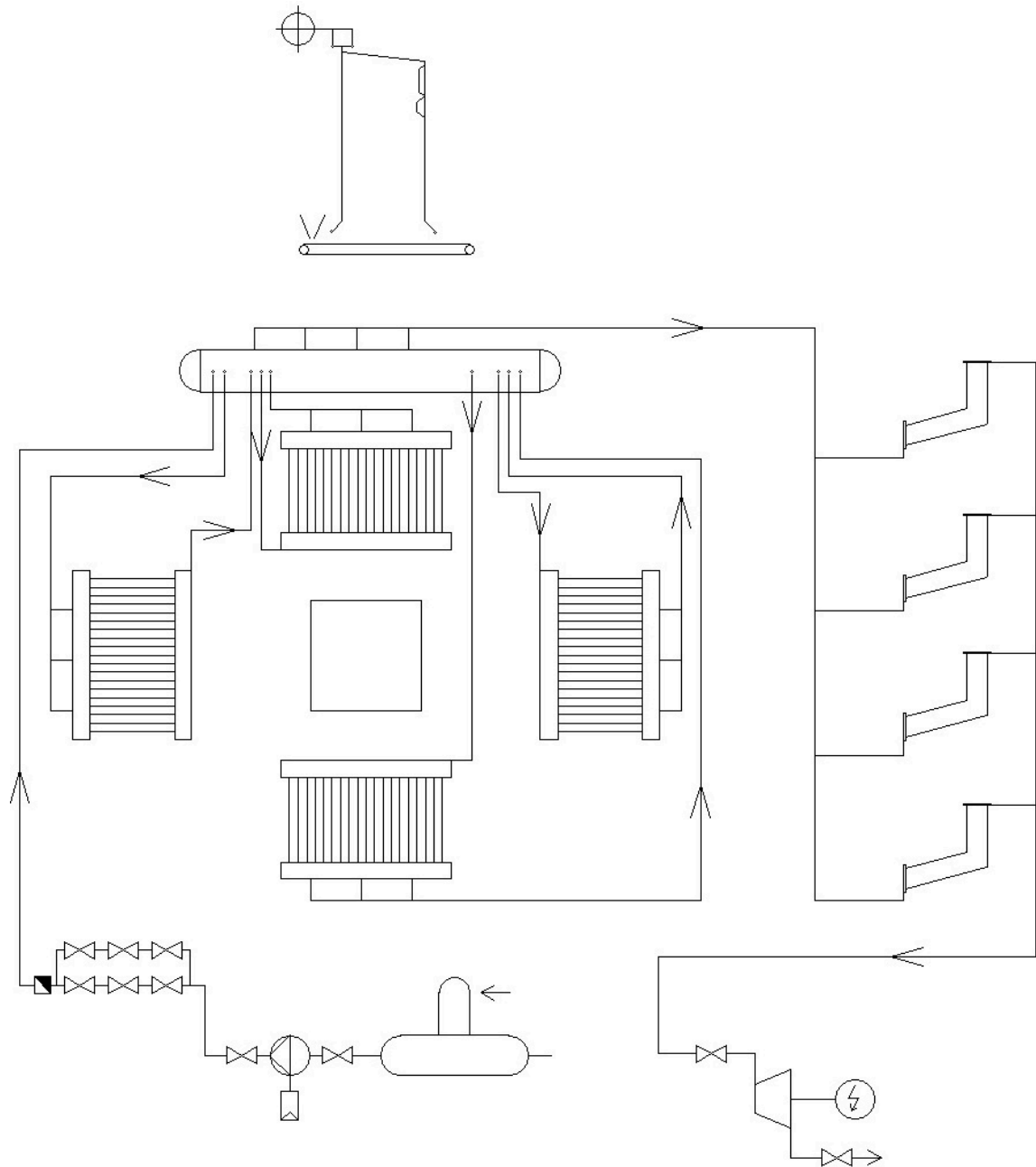
Tato ztráta je závislá na použitém materiálu izolace stěn kotle, oplechování kotle a hlavně na parním výkonu kotle. Ztráta se stanovuje odhadem dle druhu nátěru oplechování kotle. Ztrátu tedy stanovím dle [4] na straně 66 z obrázku 5-1, pro 100 tun páry hodinově a pro černý nátěr oplechování vychází hodnota takto:

$$Z_{so} = 0,015 = 1,05\%$$

Celkovou účinnost kotle tedy vyjádřím jako:

$$\eta_k = 100 - \sum_{ztr} = 100 - 4,98 - 8,05 - 0,089 - 0,695 - 1,05 = 85,14\%$$

## 5. Schéma zapojení na straně voda – pára



Obr. 15 – Schéma zapojení na straně voda-pára

Toto schéma zahrnuje napáječku, kotel, čtyři šotové přehříváky a turbínu. Kotel je s přirozenou cirkulací, čtyři stěny spalovací komory jsou zapojeny jako výparník a jsou samostatně zavodněny. Kotel může být buď samonosný, kdy sedí na nosné konstrukci roštu, nebo může být zavěšen. Na obr. 15 lze vidět schéma průtoku vody, která je nasávaná z napájecí nádrže napáječkou. Voda dále proudí přes napájecí hlavu do bubnu. Z něj jsou zavodněny čtyři stěny, které slouží jako výparník (membránová stěna – dvě trubky průměru 60,3mm spojeny praporkem).

Ve spalovací komoře dochází k transformaci chemické energie obsažené v palivu na entalpii spalin. Následně spaliny předávají své teplo do výparníku přivedené vodě. Voda se odpařuje a parovodní směs postupuje dále do parního bubnu. Ten má mimo jiné za úkol odloučit vodu od páry a páru pustit dále do šotových přehříváků (v mém případě jsou 4 šotové přehříváky, které jsou umístěny v druhém tahu kotle). Z šotových přehříváků postupuje dále mírně přehřátá pára na turbínu, která je na jedné hřídeli s turbogenerátorem. Pára vyexpandovaná na turbíně vyrobí elektřinu a poté pokračuje do směšovacího zařízení, kde se smísí se vzduchem z kompresoru a vytvoří parovzduchovou směs.

## 6. Stanovení teploty na výstupu ze spalovací komory

Délka roštu je 8700mm, šířka roštu je 7500mm. Rozměry spalovací komory jsou: výška = 14000 mm, přední strana = 6000 mm, boční stěna = 8025 mm.

Z bilančního výpočtu FES je teplo přivedené v palivu  $Q_{pal} = 138MW$ .

Nyní stanovím množství spotřeby paliva při jmenovitém výkonu kotle:

$$m_{pal} = \frac{Q_{pal}}{Q_i} = \frac{138}{23786} = 5,8kg / s$$

Teplo přivedené vzduchem:

Interpolační metodou si stanovím tepelnou kapacitu vzduchu pro 160°C z tab. 4-7, str. 45 [4].

$$C_{p,vzd,160} = 1,416kJ * m^{-3} * K^{-1}$$

$$Q_{vzd} = m_{pal} * V_{VZ,t}^S * \alpha_{spal} * c_{p,vzd,160} * t = 5,8 * 5,361 * 1,4 * 1,416 * 160 = 9862,5kW = 9,863MW$$

Celkové teplo přivedené do kotle:

$$Q_{pal,c} = 138000 + 9863 = 147863kW$$

Činná plocha roštu:

$$S_{roš} = 8,7 * 7,5 = 65,25m^2$$

Plošné zatížení roštu:

$$q_{roš} = \frac{147863}{65,25} = 2266,1kW / m^2$$

Rozměry spalovací komory jsme si s vedoucím diplomové práce zadali, počítám kontrolu plošného zatížení – vypočtené hodnoty musí být v doporučených limitách dle [4].

Činná plocha spalovací komory:

$$S_{spal,k} = 8 * 6 = 48m^2$$

Průřezové zatížení spalovací komory:

$$q_{spal} = \frac{147863}{48} = 3080,5kW / m^2$$

Objem spalovací komory (aktivní objem ohniště):

$$V_{spk} = 48 * 14 = 672m^3$$

Objemové zatížení spalovací komory:

$$q_{v,spal} = \frac{Q_{pal,c}}{V_{spk}} = \frac{147863}{672} = 220kW / m^3$$

Efektivnost spalování:

$$q_v = \frac{m_{pal} * Q_i}{V_{spk}} = \frac{5,8 * 23786}{672} = 205,3kW / m^3$$

Celkovou sálavou plocha stěn ohniště jsem stanovil pomocí výkresu kotle v autoCADu a činí:

$$F_{celk} = 491,3m^2$$

Účinná sálavá plocha stěn menší o průzory a otvory:

$$F_{úsp} = 491,3 - 1,3 = 490m^2$$

Pro výpočet účinné sálavé plochy ve spodní části spalovací komory budou umístěny 4 x dvířka o rozměrech 450x450 a také 4 pozorovací průzory o průměru 150mm.

Od celkového objemu (plochy) kotle musím odečíst tyto průzory a otvory, abych mohl počítat dále.

Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště podle Gurvičova poloempirického vztahu:

$$\Theta_{OK} = \frac{T_{OK}}{T_{np}} = \frac{B_o^{0,6}}{M * a_o^{0,6} + B_o^{0,6}} = \frac{0,79^{0,6}}{0,532 * 0,821^{0,6} + 0,79^{0,6}} = 0,647$$

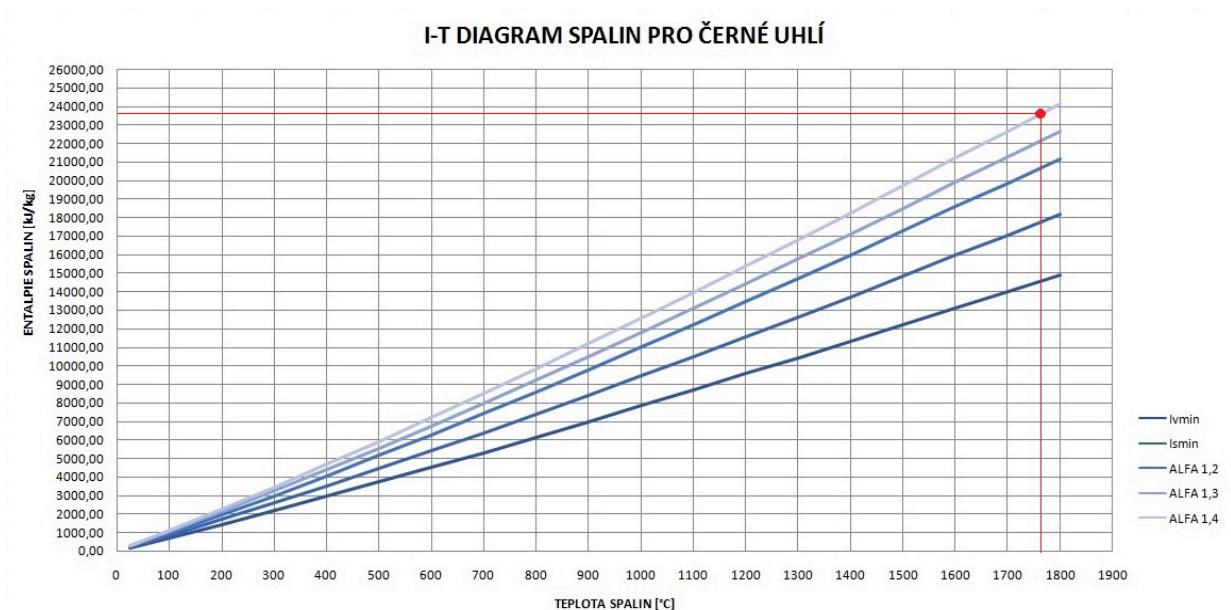
Kde  $T_{np}$  je teplota nechlazeného plamene,  $B_o$  je Boltzmanovo číslo,  $M$  je součinitel,  $a_o$  je stupeň černosti ohniště.

$T_{OK}$  je teplota na konci spalovací komory, zvolená dle [4]. Teplotu jsem zvolil 1050°C.

Teplota nechlazeného plamene:

$$Q_u = Q_{ired} * (1 - Z_{CO} - Z_C - Z_f) + Q_v = 23786 * (1 - 0,0008875 - 0,05941 - 0,00695) + 1700 = 23886,5 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1}$$

Z I-t diagramu pro přebytek vzduchu 1,4 a entalpii spalin 23886,5 kJ/kg vychází teplota spalin 1770°C.



Obr. 16 – I-t diagram spalin



Entalpie spalin pro 160°C a přebytek vzduchu  $\alpha=1,4$

$$i_{sp,c} = i_{CO_2} + i_{SO_2} + i_{N_2} + i_{Ar} + i_{H_2O} + i_{O_2} = 281 + 312,1 + 207,7 + 148,84 + 242,72 + 212,64 = 1405 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{CO_2} = \frac{170 + 357,5}{300} * 160 = 281 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{SO_2} = \frac{191 + 394,1}{300} * 160 = 312,1 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{N_2} = \frac{129,5 + 259,9}{300} * 160 = 207,7 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{Ar} = \frac{93,07 + 186}{300} * 160 = 148,84 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{H_2O} = \frac{150,6 + 304,5}{300} * 160 = 242,72 kJ * kg^{-1}$$

$$i_{O_2} = \frac{131,7 + 267}{300} * 160 = 212,64 kJ * kg^{-1}$$

Teplota spalin na výstupu z ohniště:

$$T_{sp,výs} = \frac{T_{teor} + 273,15}{1 + M * \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1770 + 273,15}{1 + 0,532 * \left(\frac{0,938}{0,79}\right)^{0,6}} - 273,15$$

$$T_{sp,výs} = \frac{2043,15}{1,59} - 273,15$$

$$T_{sp,výs} = 1012^{\circ}C$$

## Součinitel M

Jedná se o veličinu, která zohledňuje průběh teplot v ohništi. Je závislá na druhu spalovaného paliva a také na maximální poloze plamene v ohništi – odvozuje se podle umístění hořáků v ohništi a jejich výšky. Jelikož nemám hořáky, protože v mém případě se spaluje palivo na roštu, můžu část výpočtu zanedbat. Pro spalování popelnatých černých uhlí a paliv s malým podílem prchavé hořlaviny použiju následující vztah:

$$M = 0,56 - 0,2 * x_{pl} = 0,56 - (0,2 * 0,14) = 0,532$$

Pro spalování paliva na roštu v tenké vrstvě (s pohazováním či bez) je hodnota  $x_{pl}$  rovna nule. Pokud je vrstva silná, bere se hodnota  $x_{pl} = 0,14$ .

$$x_{pl} = x_h + \Delta x = 0,14$$

kde  $x_{pl}$  je poloha maximální teploty plamene v závislosti na hořácích,  $x_h$  je výška hořáků ve spalovací komoře,  $\Delta x$  je potom korekce pro případ, jestliže se maximální teplota plamene nenachází v úrovni hořáků.

## Boltzmanovo číslo

Jedná se o podobnostní kritérium stanovené pro účel výpočtu ohniště.

$$B_o = \frac{\varphi * m_{pal} * O_{sp} * C}{5,7 * 10^{-11} * \psi * F_{st} * T_a^3} = \frac{0,988 * 5,8 * 14,15}{5,7 * 10^{-11} * 0,4275 * 490 * 2043,15^3} = \frac{81,1}{101,8} = 0,79$$

Kde  $\psi$  je střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn,  $F_{st}$  je celkový projekční povrch stěn kotle,  $T_a$  je teplota nechlazeného plamene,  $\varphi$  je součinitel uchování tepla a  $O_{sp} * C$  je střední tepelná jímavost spalin.

## Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{1,05}{85 + 1,05} = 0,988$$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn:

$$\psi = x_{st} * \xi = 0,95 * 0,45 = 0,4275$$

Hodnota úhlového součinitele osálení  $x_{st}$  stanovena z obr. 6-2, strany 85 v literatuře [4].

Hodnotu součinitele zanesení stěn ohniště  $\xi$  stanovím dle [4] na hodnotu 0,45.

Střední tepelná jímavost spalin ohniště:

$$O_{sp} * C = \frac{I_u - i_o}{v_a - v_o} = \frac{23589,74 - 13400}{1770 - 1050} = 14,15 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{C}$$

Kde  $I_u$  je užitečné teplo uvolněné v ohništi,  $i_o$  je entalpie spalin pro 1050°C,  $v_a$  je teplota nechlazeného plamene a  $v_o$  je teplota zvolená = 1050°C.

Užitečné teplo uvolněné v ohništi:

$$I_u = Q_{celk} * \frac{100 - \Sigma z_{tr}}{100 - z_c} = 23786 * \frac{100 - 0,695 - -4,98 - 0,089}{100 - 4,98} = 23589,74 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1}$$

Stupeň černosti ohniště pro roštový kotel:

Tato veličina určuje sálavé vlastnosti plamene a také stěn ohniště. Pro její určení použiju následující vztah:

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) * \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) * (1 - \psi) * (1 - \frac{R}{F_{st}})} = \frac{0,844 + (1 - 0,844) * \frac{65,25}{490}}{1 - (1 - 0,844) * (1 - 0,4275) * (1 - \frac{65,25}{490})} = \frac{0,865}{0,923} = 0,938$$

kde  $a_{pl}$  je stupeň černosti plamene,  $R$  značí plochu spalovaného paliva na roštu.

Plocha hořící vrstvy na roštu:

$$R = a * b = 7,5 * 8,7 = 65,25 \text{ m}^2$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 3,6 * \frac{V_o}{F_{celk}} = 3,6 * \frac{672}{490} = 4,94m$$

Koncentrace popele ve spalínách:

$$\mu_{PK} = \frac{A^r * (X_{\dot{u}} + 1)}{2 * G_s} = \frac{0,2367 * (0,25 + 1)}{2 * 10,7} = 0,0138kg * kg^{-1}$$

Kde  $X_{\dot{u}}$  je úlet popílku,  $G_s$  je hmotnost spalin.

Hmotnost spalin:

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 * \alpha_{ok} * V_{vz,v}^t = 1 - 0,2367 + 1,306 * 1,4 * 5,436 = 10,7kg * kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:

$$k_s = \left( \frac{2,49 + 5,11 * r_{H_2O}}{\sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{t_{OK} + 273,15}{1000} \right) =$$

$$= \left( \frac{2,49 + 5,11 * 0,07}{\sqrt{0,01994 * 4,94}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{1050 + 273,15}{1000} \right) = 4,11$$

Objemový podíl  $r_{H_2O}$  :

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} + (\chi_v - 1) * (\alpha_{OK} - 1) * V_{vz,v}^t}{V_{sp,sk}^v + (\alpha_{OK} - 1) * V_{vz,v}^t} = \frac{0,584 + (1,014 - 1) * (1,4 - 1) * 5,436}{6,57 + (1,4 - 1) * 5,436} = \frac{0,614}{8,74} = 0,07$$

Objemový podíl  $r_{RO_2}$  :

$$r_{RO_2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^v + (\alpha_{OK} - 1) * V_{vz,v}^t} = \frac{1,129 + 0,00253}{6,57 + (1,4 - 1) * 5,436} = \frac{1,13153}{8,7444} = 0,1294$$

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,07 + 0,1294 = 0,1994$$

Parciální tlak tříatomových plynů:

$$p_s = r_s * p_{bar} = 0,1994 * 0,1 = 0,01994MPa$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi:

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(t_{OK} + 273,15)^2 \cdot d_{PK}^2}} = \frac{57000}{\sqrt[3]{(1050 + 273,15)^2 \cdot (20 \cdot 10^{-6})^2}} = 64,187$$

Kde  $d_{PK}$  je efektivní průměr částic popílku a dle str 90 lit. [4] volím hodnotu 20 mikrometrů.

Optická hustota plamene:

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_P \cdot \mu_{PK} + k_{KOK} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2) \cdot p \cdot s = (4,11 \cdot 0,1994 + 64,187 \cdot 0,0138 + 10 \cdot 0,5 \cdot 0,03) \cdot 0,1 \cdot 5,5 = 1,86$$

Kde  $k_{KOK}$  je součinitel, jehož rozměr je 10 dle str. 91 lit.[4],  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  jsou bezrozměrné charakteristiky zohledňující koncentraci kyslíku v plameni – hodnoty str. 91 lit. [4].

Efektivní stupeň černosti plamene v jakémkoliv prostředí v ohništi:

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-(1,86)} = 0,844$$

**Množství vyrobené páry:**

$$Q_{SK} = Q_u - Q_{dt} = 23886 - 14100 = 9786 \text{ kJ} / \text{kg}_{pal}$$

$Q_{dt}$  pro teplotu  $T_{SP, VYS}$  odpovídá hodnotě 14100 kJ/kg.

Od celkového vyrobeného tepla musím odečíst teplo odcházející ve spalinách do druhého tahu kotle. Vypočtené teplo, předané do teplosměnných ploch násobím hmotnostním tokem paliva do kotle.

$$Q_V = Q_{SK} \cdot m_{pal} = 9786 \cdot 5,8 = 56758 \text{ kW}$$

Z tabulek pro tlak 12 bar jsem zjistil následující parametry:

$$p = 12 \text{ bar} \quad i = 798 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad i''' = 2783 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad i_{NV}^{105} = 430 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Množství vyrobené páry se stanoví následovně:

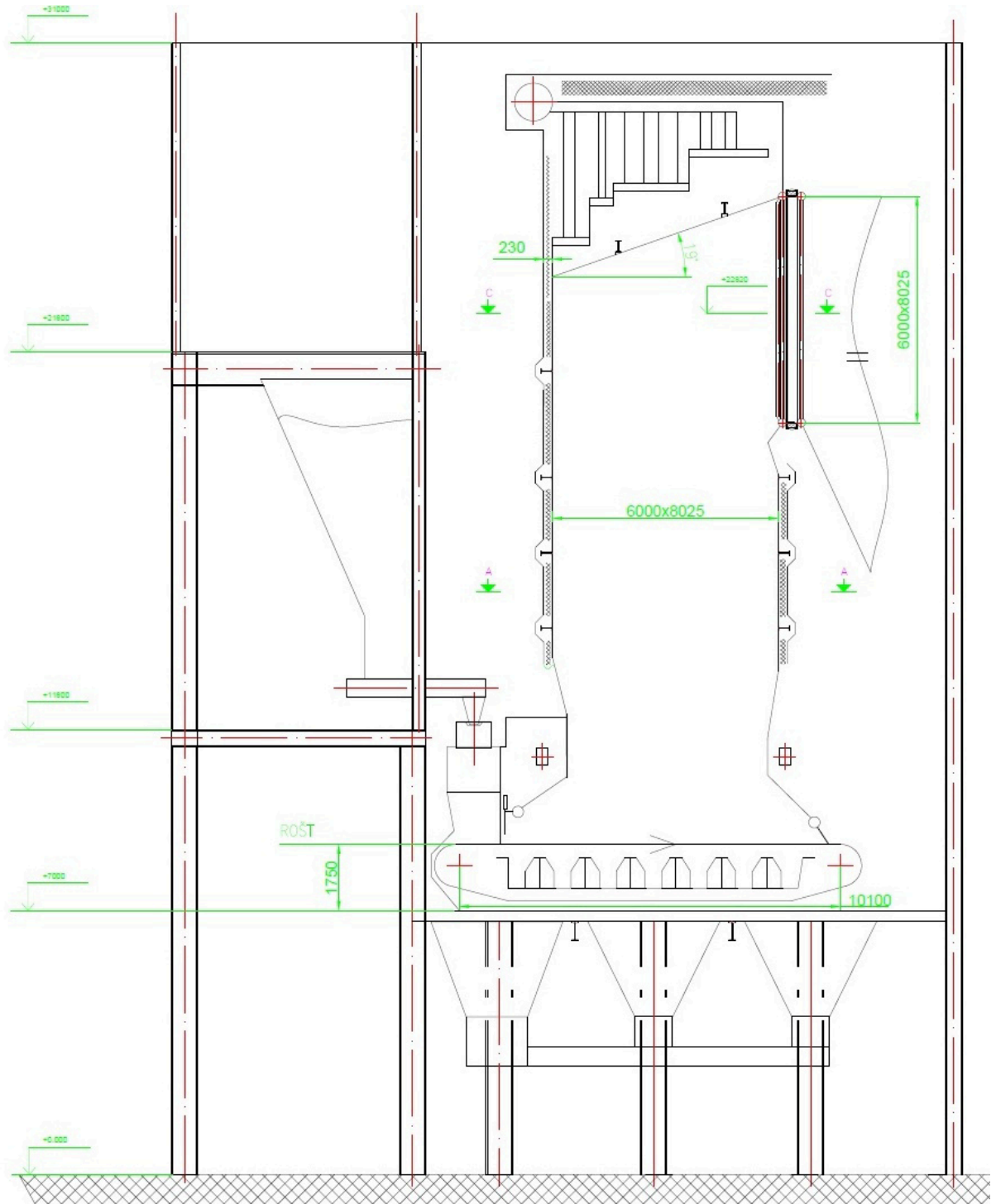
$$m_p^{12} = \frac{Q_V}{i''' - i} = \frac{56758}{2783 - 430} = 24,12 \text{ kg} / \text{s} = 86,9 \text{ t} / \text{h}$$

## 7. Výpočtový projekt spalovací komory

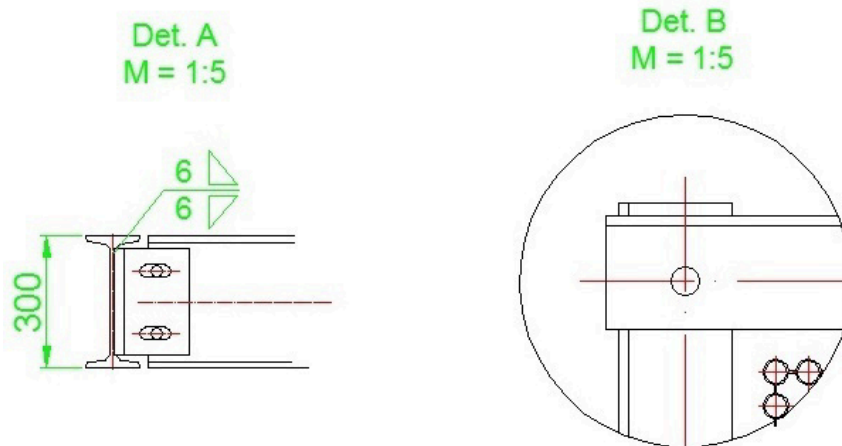
V této kapitole jsem měl za úkol nakreslit projekční výkres zadaného kotle. Výkres obsahuje jak samotný kotel, tak řešení bandáží proti explozi a také tepelnou dilataci spalovací komory. Na obr. 17 lze vidět řez navrženého kotle – obsahuje zásobník paliva, kde je šnekovým dopravníkem posouváno palivo do výsypky roštu. Palivo padá na rošt a výšku sypané vrstvy reguluje hradítko, které je zavěšeno na řetězu a je ovládáno řídicím orgánem. Rošt je pásový a točí se ve směru doprava. Spalovací vzduch je rozdělen na primární a sekundární. Primární proudí skrz roštnicemi a zároveň je chladí. Je rozdělen na několik okruhů samostatně řízených. Mezerami mezi roštnicemi také propadá jemně mleté palivo – ztráta nedopalem ve strusce. Sekundární vzduch je přiváděn dvěma kanály umístěnými po stranách kotle. Na druhé straně kotle je umístěna deska na čepu, která při pohybu roštu doprava brání přísávání vzduchu. Vyhořelé palivo padá do zásobníku strusky umístěného pod roštem a je dopravováno dále (chlazení, zásobník).

Rošt je rozdělen na několik částí – sušení paliva, uvolňování prchavé hořlaviny, zapálení paliva, vyhoření – z toho vyplývá, že celková délka roštu je 10,1m z čehož pouze 8,7m je činná plocha roštu. Spaliny vzniklé hořením putují svisle vzhůru a předávají svou energii (entalpii) stěnám spalovací komory – výparníku. Ve výparníku proudí voda, která je dopravována do bubnu z napájecí nádrže napájecím čerpadlem. Úkolem výparníku je část vody vypařit a parovodní směs předat do parního bubnu, umístěného nad stropem kotle. Na obvodu kotle jsou umístěny teplé bandáže, které jsou složeny z IPE profilů a jsou sčepovány. Teplá bandáž z důvodu izolace těchto profilů čedičovou vatou o síle 230mm. Na obr. 18 vlevo lze vidět vzájemné spojení dvou IPE profilů. Princip je následující – jeden profil se upálí (nechá se pouze stojna profilu) a na oba profily se koutovými svary navaří desky, které mají připravenou oválnou díru. Do této díry se vloží čep, který vytvoří spoj. Tento spoj může dilatovat pouze do stran, nikoliv však nahoru nebo dolů. Celkový pohled na spojení bandáží lze vidět na obr. 19. Takové řešení sčepování bandáží je z důvodu výstupu spalin do druhého tahu kotle. Takové spojení bandáží dovolí kotli malou dilataci, ale hlavně zabrání posuvu či deformaci kotle pokud by došlo k explozi v kotli. Spaliny proudící přes spalovací komoru putují dále do druhého tahu kotle. Pokud bychom nechali stěnu dělicí jednotlivé tahy jako na obr. 20, tak bychom docílili výrazného snížení rychlosti proudících spalin a mohlo by dojít k zalepení mezer mezi trubkami. Proto přechod mezi jednotlivými tahy řeším jako na obr. 20 vpravo, kdy jedna řada trubek se

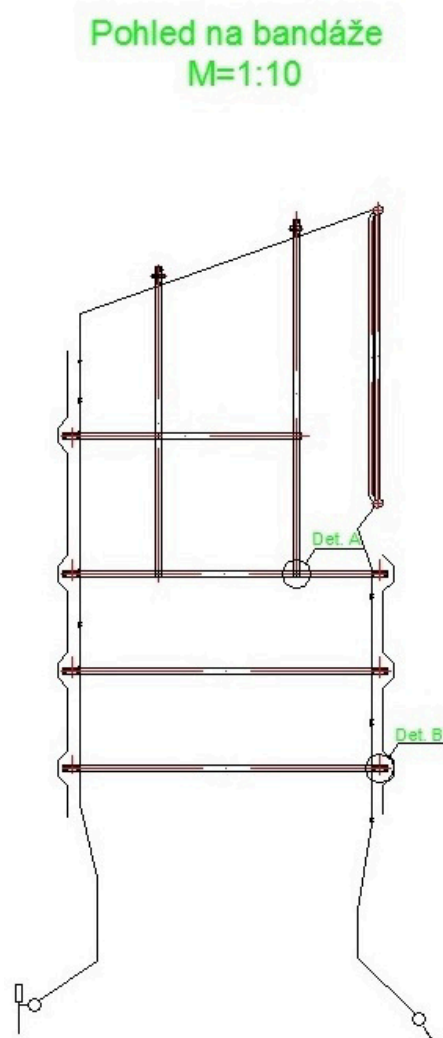
vždy vyhne k druhé – tímto se vytvoří dostatečný prostor pro proudící spaliny a nesnížím tolik rychlost spalin. Mezi prvním a druhým tahem kotle je umístěno také těsnění, které má jednak za funkci těsnit oba tahy kotle, a také funkci dilatace. Detail tohoto těsnění lze vidět na výkrese v příloze diplomové práce.



Obr. 17 – Řez kotle



Obr. 18 – Vlevo detail spoje dvou IPE profilů, vpravo detail možnosti dilatace membránové stěny



Obr. 19 – Umístění a vzájemné sčepování bandáží



### Průtočný průřez trubek:

Z důvodu použití jiného průměru trubek výparníku a stěny pro přechod do druhého tahu je nutno udělat kontrolu průtočného průřezu trubek.

Pro trubky výparníku ( $\phi 60,3 \times 3,6 \text{ mm}$ )

Vnitřní průměr trubky:

$$d_1 = D - 2 * t = 60,3 - (2 * 3,6) = 53,1 \text{ mm}$$

Průtočný průřez trubek:

$$S_{\text{pr}\ddot{u}\text{r},60,3} = \frac{\pi * d_1^2}{4} * n = \frac{\pi * 53,1^2}{4} * 108 = 0,2392 \text{ m}^2$$

Pro trubky výparníku ( $\phi 88,9 \times 4 \text{ mm}$ )

Vnitřní průměr trubky:

$$d_2 = D - 2 * t = 88,9 - (2 * 4) = 80,9 \text{ mm}$$

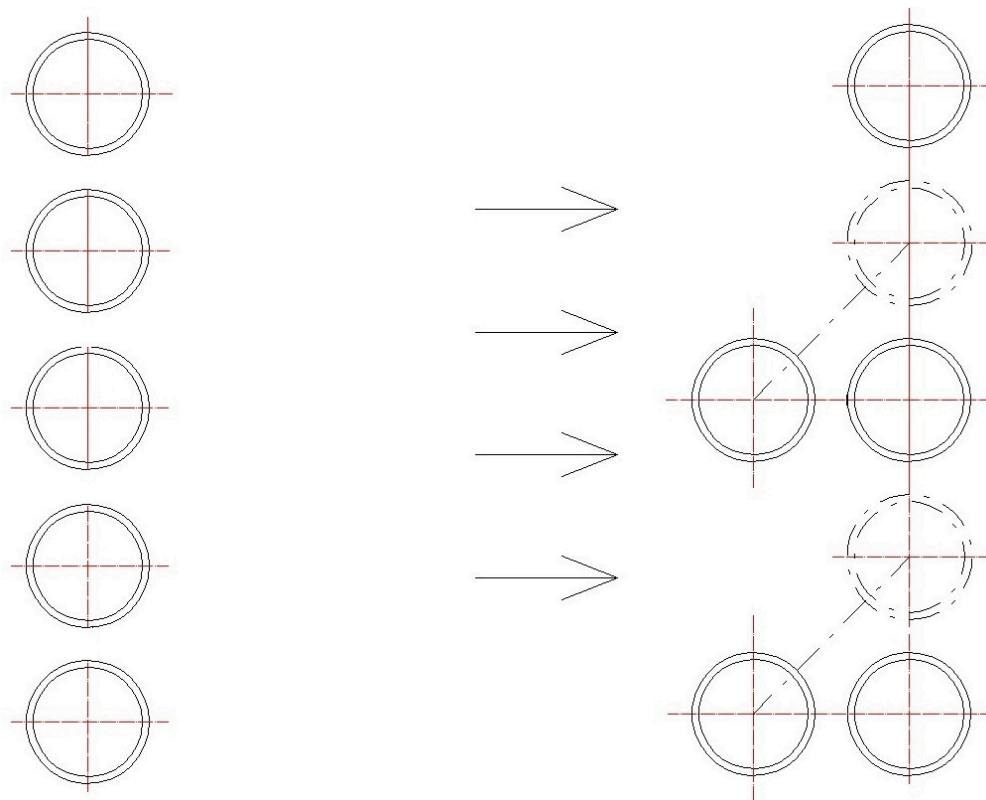
Průtočný průřez trubek:

$$S_{\text{pr}\ddot{u}\text{r},88,9} = \frac{\pi * d_2^2}{4} * n = \frac{\pi * 80,9^2}{4} * 48 = 0,2466 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{pr}\ddot{u}\text{r},60,3} \leq S_{\text{pr}\ddot{u}\text{r},88,9}$$

Podmínka je tedy splněna, můžu použít tento průměr a počet trubek.

Pro přechod do druhého tahu kotle jsem použil trubky o větším průměru. Je to z důvodu vyhnutí trubek, aby mohly spaliny proudit dále a nebyla příliš snížena jejich rychlost. Na obr. 19 lze vidět jeden ze způsobů vyhnutí trubek.



*Obr. 20 – Vlevo membránová stěna SK, vpravo vyhnutí při přechodu do druhého tahu*

## Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo provést rešerži roštových parních kotlů, stručně nastínit princip funkce Flexibilního energetického systému, provést výpočet stechiometrie spalování a účinnost kotle dle zadaných parametrů, provést tepelný výpočet spalovací komory a vypracovat výpočtový projekt spalovací komory.

V mé práci jsem se věnoval základnímu přehledu používaných roštů parních kotlů, jejich výhodami a nevýhodami, vlastnostmi a parametry. Následně jsem se ve své práci věnoval výpočtu stechiometrie spalování – množství vzduchu potřebného pro spálení zadaného paliva, množství vzniklých spalin, koncentrace složek ve spalinách a stanovení účinnosti spalování. Účinnost mnou navrženého kotle vyšla 85,14%. Dále jsem navrhnul a popsal schéma zapojení na straně vody – páry.

Pokračoval jsem ve své práci výpočtem teploty na konci spalovací komory a všech veličin k tomu potřebných. Teplota nechlazeného plamene vyšla 1770 °C a teplota na konci spalovací komory 1012°C. Výpočet by mohl být ještě přesnější, pokud bych použil více iterací pro získání lepšího výsledku. Následně jsem stanovil množství vyrobené páry, které činilo 86,9 t/h. V závěru své diplomové práce jsem vypracoval výpočtový projekt spalovací komory, který obsahuje mnou navržený kotel, jeho řezy a detaily.

Díky mé práci se zjistilo, že spalovací komora s roštovým ohništěm je vhodná pro použití u Flexibilního energetického systému.

## Seznam použité literatury

- [1] VILIMEC, KONVIČKA, KUPSA. *Výstavba demonstrační jednotky pro vývoj Flexibilního energetického systému a prototypu Integrovaného zdroje pro bioplynové stanice*. 11s.
- [2] Kotle na tuhá paliva. [online]. Dostupné na: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [3] HONSIG, F. *Rošty parních kotlů a spalování méněhodnotných paliv*. PRAHA 1952, 169s.
- [4] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vydavatelství ČVUT, PRAHA 2002, 212s. ISBN 80-01-02591-8.
- [5] Roštová ohniště [online]. Dostupné na: [http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CEEQFjAB&url=http%3A%2F%2Ffsinet.fsid.cvut.cz%2Fcz%2FU207%2FU2072%2FRO.ppt&ei=uChqU4n5FO6X0QWQsYCABg&usg=AFQjCNFSIX4Z7-P714rZqLipYEmd4f3C\\_A&sig2=ZzUtzzoW5z-Gb62sLPc4xg&bvm=bv.66111022,d.d2k](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CEEQFjAB&url=http%3A%2F%2Ffsinet.fsid.cvut.cz%2Fcz%2FU207%2FU2072%2FRO.ppt&ei=uChqU4n5FO6X0QWQsYCABg&usg=AFQjCNFSIX4Z7-P714rZqLipYEmd4f3C_A&sig2=ZzUtzzoW5z-Gb62sLPc4xg&bvm=bv.66111022,d.d2k)
- [6] VILIMEC L., JOSIEK J. *Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů*. Ostrava: VŠB-TU, 2011. ISBN 978-80-248-2512-0.

## **Příloha**

1. Výkres č. 10000-1 – Kotel s pásovým roštem (rozměr A0)

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za poskytnuté konzultace, odbornou pomoc a rady a za vedení mé práce.