

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

**Ohřívák parovzduchové směsi kotle pro Flexibilní
energetický systém (FES)**

**Steam – air mixture heater of the boiler for flexible energy
system**

Student:

Valigura Ondřej

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Valigura**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Ohřívák parovzduchové směsi kotle pro Flexibilní energetický systém (FES)**
Steam - Air Mixture Heater of the Boiler for FES

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte řešení pro flexibilní energetický systém s roštovým ohništěm
2. Proveďte stechiometrické výpočty pro spalování černého uhlí
3. Stanovte vlastnosti parovzduchové směsi
4. Vypracujte schéma voda-pára
5. Proveďte tepelný výpočet zadaného OPVS
6. Vypracujte výpočtový projekt zadaného OPVS

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02591-8.
Firemní literatura VÍTKOVICE POWER ENGINEERING, a.s. Ostrava

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

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

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

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 bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

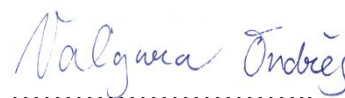
V Ostravě: 16. května 2015


.....
podpis

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 užit (§ 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 užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněná 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 obhajoby.

V Ostravě: 16. května 2015



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce
Adresa trvalého pobytu autora práce

Valigura Ondřej
Halenkov 367, 756 03

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za odborné vedení, ochotu a cenné rady, které mi při zpracování diplomové práce poskytl a také děkuji rodičům za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VALIGURA, O. *Ohřívák parovzduchové směsi kotle pro flexibilní energetický systém (FES)*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 73 s. Vedoucí práce: Vilimec, L.

V diplomové práci se zabývám flexibilním energetickým systémem (FES), který vyvíjí firma Vítkovice Power Engineering. Tato koncepce využívá Braytonův a Rankinův cyklus a tato kombinace se nazývá paroplynový cyklus. Paroplynový cyklus se v tomto případě realizuje při spalování uhlí. Tento systém je navržen tak, že v tomto případě roštový kotel vytváří páru, která se mísí se stlačeným vzduchem za vzniku parovzduchové směsi (PVS). Tato směs se ohřívá v ohříváku parovzduchové směsi (OPVS). Ohřívák je tvořen deskami z membránových stěn a je koncipován z několika částí. Cílem této práce bylo vypočítat velikost teplosměnné plochy jedné z těchto částí a vypracovat projekční návrh vstupní části ohříváku parovzduchové směsi, přičemž jsem detailněji rozkreslil několik variant zavěšení teplosměnné plochy do tahu kotle. Na závěr popisují výhody a nevýhody při výrobě, provozu a údržbě OPVS provedeného jako membránová stěna.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VALIGURA, O. *Steam – air mixture heater of the boiler for flexible energy systém (FES)*: master thesis. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of mechanical engineering, Department of energy, 2015, 73 s. Thesis head: Vilimec, L.

In my master thesis I deal with flexible energy systém which develops the company Vítkovice Power Engineerig. This concept uses a Brayton and Rankine cycle and this combination is called a steam – gas cycle. Steam – gas cycle is in this case realized in the combustion of coal. This systém is designed so that, in this case the grate boiler produces steam which is mixed with compressed air to form a steam – air mixture. This mixture is heated in steam – air mixture heater. The heater comprises a plate from membrane walls and is designed of several parts. The aim of this thesis was calculate the size of the heat transfer surfaces one of these regions and develop a design proposal for the inlet of the steam – air mixture heater, while i sketched in detail several variations of hanging heat transfer surfaces in the boiler draft. Finally I describe the advantages and disadvantages during production, operation and maintenance of steam – air mixture heater designed as membrane wall.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Zadání diplomové práce	11
1. Úvod.....	13
2. Rešerše pro flexibilní energetický systém s roštovým ohništěm	14
2.1 Flexibilní energetický systém	14
2.2 Kotle, základní části kotlů, rozdělení.....	16
2.3 Rozdělení parních kotlů	16
2.4 Rozdělení ohnišť podle rychlosti proudění plynu.....	16
2.5 Rozdělení kotlů dle používaného paliva a typu ohniště.	17
2.6 Prášková ohniště se spalováním ve vzosu.	19
2.6.1 Kotle s výtavným ohništěm.	19
2.6.2 Kotle s granulačním ohništěm.	22
2.7 Spalování tuhých paliv ve fluidní vrstvě	23
2.7.1 Kotle s fluidním ohništěm se stacionární fluidní vrstvou.....	24
2.7.2 Kotle s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou.....	24
2.8 Roštová ohniště.....	29
2.8.1 Kotle s pevným roštem.....	30
2.8.2 Kotle s mechanickým roštem	31
3. Výpočet struskování, kontrola výhřevnosti a stanovení stechiometrie zadaného paliva	37
3.1 Struskování	37
3.2 Odstraňování nánosů v kotli	38
3.2.1 Parní ofukovače:	39
3.2.2 Pulzní čištění tlakovým vzduchem	40
3.3 Kontrola stanovení výhřevnosti	42
3.4 Stechiometrické výpočty pro spalování zadaného paliva.....	45

4. Vlastnosti parovzduchové směsi	53
4.1 Definice parovzduchové směsi	53
4.2 Hmotnostní koncentrace a parciální tlaky	54
4.2.1 Hmotností koncentrace složek směsi.....	54
4.2.2 Parciální tlaky složek směsi.....	55
4.3 Termodynamické vlastnosti parovzduchové směsi	56
4.3.1 Entalpie pvs směsi	56
4.3.2 Hustota parovzduchové směsi	57
4.3.3 Tepelná vodivost parovzduchové směsi	57
4.3.4 Viskozita parovzduchové směsi	58
5. Schéma voda – pára.	59
6. Tepelný výpočet OPVS.	61
6.1 Stanovení počtu trubek vstupní části OPVS III.	61
6.2 Výpočet velikosti vstupní teplosměnné plochy OPVS III.	66
6.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně parovzduchové směsi.....	66
6.2.2 Přestup tepla na straně spalin	68
6.2.3 Přestup tepla sáláním	69
6.2.4 Výpočet velikosti teplosměnné plochy OPVS III	72
7. Závěr:	75
Seznam obrázků	76
Seznam tabulek	77
Seznam příloh.....	77
Seznam použité literatury	78

Seznam použitých značek a symbolů

A	-, [%]	hmotnostní podíl popela v palivu
a	-, [-]	stupeň černosti proudu spalin
a,b	-, [m]	rozměry tahu
a _{st}	-, [-]	stupeň povrchu černosti stěn
C _D	-, [-]	opravný koeficient na průměr trubky
C _f	-, [-]	opravný koeficient na jemnost popílkových částic
c _p	-, [kJ/kgK]	střední měrná tepelná kapacita
C _s	-, [-]	korekční součinitel na uspořádání svazku
C _Z	-, [-]	korekční součinitel na počet řad svazku
d	-, [kg/kg]	měrná vlhkost vzduchu
D	-, [m]	vnější průměr
d	-, [m]	vnitřní průměr trubky
i	-, [kJ/kg]	entalpie
k	-, [W/m ² K]	součinitel prostupu tepla
k _{ps}	-, [-]	optická hustota spalin
k _s r _s	-, [-]	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
l	-, [m]	délka
M	-, [kg/kmol]	molární hmotnost
m	-, [kg/s]	hmotnostní průtok
m _{pal}	-, [kg/s]	množství přivedeného paliva
m _{p_v}	-, [kg/s]	skutečná spotřeba paliva
n	-, [-]	počet trubek, desek, trubek v desce
O	-, [m _N ³ /kg]	objem na jednotku paliva
p	-, [MPa]	tlak
Pr	-, [-]	Prandtlovo kritérium
p _s	-, [MPa]	celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách
Q	-, [W]	tepelný výkon
Q _i	-, [kJ/kg]	výhřevnost paliva
r	-, [kJ/kgK]	měrná plynová konstanta
r _{H₂O}	-, [-]	objemová koncentrace vodní páry ve spalinách
r _{RO₂}	-, [-]	objemová koncentrace CO ₂ a SO ₂ ve spalinách
r _s	-, [-]	objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách
s	-, [m]	účinná tloušťka sálavé vrstvy spalin
S	-, [m ²]	plocha
s ₁	-, [m]	příčná rozteč svazku

s_2	- , [m]	podélná rozteč svazku
t	- , [°C]	teplota
T	- , [K]	teplota
V	- , [m ³ /s]	objemový průtok
W	- , [%]	hmotnostní podíl vody v palivu
w	- , [kg/kg]	koncentrace
w	- , [m/s]	rychlost
y	- , [kmol/kmol]	molární podíl
Z	- , [%]	ztráty
α	- , [-]	součinitel přebytku vzduchu ve spalinách
α	- , [W/m ² K]	součinitel přestupu tepla
β	- , [-]	korekční součinitel
Δt	- , [°C]	střední teplotní logaritmický spád
$\Delta \varepsilon$	- , [-]	přirážka na součinitel zanesení
ε	- , [m ² K/W]	součinitel zanesení plochy
ε_0	- , [m ² K/W]	základní hodnota součinitele zanesení
η	- , [Pa/s]	dynamická viskozita
λ	- , [w/mK]	součinitel tepelné vodivosti
ρ	- , [kg/m ³]	hustota
σ_1	- , [-]	poměrná příčná rozteč
σ_2	- , [-]	poměrná podélná rozteč
σ_2'	- , [-]	poměrná úhlopříčná rozteč
ν	- , [m ² /s]	kinematická viskozita
ν	- , [m ³ /kg]	měrný objem
ϕ	- , [-]	korelace
φ_d	- , [-]	parametr
ψ	- , [-]	součinitel přechodu od protiproudého ke kombinovanému zapojení
ω	- , [%]	procentuální množství spalin
ω	- , [-]	součinitel omývání plochy
$\omega_{RO_2,max}$	- , [%]	maximální poměrný objem tříatomových plynů

Dolní indexy

1	vstup
2	výstup
pvs	parovzduchová směs
sp	spaliny
sal	sálání
SV	spaliny vlhké
VV	vzduch vlhký
VS	vzduch suchý
N	normální podmínky
min	minimální
sk	skutečné
k	konvekce
sm	směs
vp	vodní pára
OPVS	ohřívač parovzduchové směsi

Horní indexy

r	původní stav
d	bezvodý stav
daf	stav bez vody a popela

Zadání diplomové práce

Ohřívák parovzduchové směsi kotle pro flexibilní energetický systém (FES)

1. Vypracujte rešerši pro flexibilní energetický systém s roštovým ohništěm.
2. Proved'te stechiometrické výpočty pro spalování černého uhlí.
3. Stanovte vlastnosti parovzduchové směsi.
4. Vypracujte schéma voda – pára.
5. Proved'te tepelný výpočet zadaného OPVS.
6. Vypracujte výpočtový projekt zadaného OPVS.

Výpočtové parametry:

Palivo:

V kotli se bude spalovat polské černé uhlí z dolu Jankowice, zrnění 0 – 20 mm.

- Výhřevnost..... 23 MJ/kg
- Obsah popela A^r 18 %
- Obsah vody W^r 9 %
- Obsah síry S^r celkové..... 0,5 %
- Prchavá hořlavina V^{daf} 38,76 %

Prchavé složení hořlaviny (surový vzorek):

- C^r 59,06 %
- N^r 1,10 %
- H^r 4,13 %
- O^r 8,21

Kontrola zadaného paliva:

$$\sum A^r + W^r + S^r + C + N + H + O$$

$$\sum 18 + 9 + 0,5 + 59,06 + 1,10 + 4,13 + 8,21 = 100$$

$$\underline{\underline{\sum = 100 [\%]}}$$

Chemické složení popela:

SiO ₂	43,74	Al ₂ O ₃	28,58	Fe ₂ O ₃	9,17
CaO.....	4,0	MgO.....	2,73	Na ₂ O.....	1,12
K ₂ O.....	2,96	SO ₃	2,47	TiO ₂	1,04
P ₂ O ₅	1,77	Mn ₃ O ₄	0,05	BaO.....	0,41
SnO	0,29	ZnO.....	1,20		

Granulometrie:

nad 20	mm.....	0,00 %
20 – 10	mm.....	14,45 %
10 – 8	mm.....	4,66 %
8 – 6,3	mm.....	3,03 %
6,3 – 4,0	mm.....	21,45 %
4,0 – 2,0	mm.....	21,91 %
2,0 – 0,71	mm.....	19,35 %
do 0,71	mm.....	15,15 %

Další zadané hodnoty potřebné pro výpočet:

- součinitel přebytku vzduchu $\alpha_k = 1,3 [-]$

1. Úvod

V dnešní době si nelze představit život bez elektrické energie, na které jsme se stali závislí. S růstem populace roste i poptávka po elektřině a teple, kterou je nutné zajistit. Proto se staví nové energetické celky ať už podkritické či nadkritické. Podkritické elektrárny pracují bohužel s nízkou účinností. U nadkritických elektráren je tato účinnost vyšší, ale, jsme omezeni použitými materiály. Pro zvýšení celkové účinnosti transformace primární energie vyvíjí firma Vítkovice Power Engineering (VPE) tzv. flexibilní energetický systém (FES). Tento systém využívá jak Rankinův tak i Braytonův oběh. Kombinace těchto oběhů se nazývá paroplynový cyklus a v tomto případě se realizuje při spalování uhlí. Účinnost takového klasického cyklu může dosahovat až 60%. Klasický paroplynový cyklus pracuje na principu spalování plynu ve spalovací komoře, kde přivádíme stlačený vzduch z kompresoru. Následuje expanze na plynové turbíně. Výchozí spaliny však obsahují zbytkové teplo, které se využívá v kotli na odpadní teplo (heat recovery steam generation HRSG). Spaliny předávají teplo vodě, která se mění na páru a poté dochází ke klasické expanzi v parní turbíně. U systému FES se místo spalování drahého plynu spaluje uhlí, při chlazení spalovací komory se vyrábí pára, která se smísí se stlačeným vzduchem z kompresoru (parovzduchová směs). To znamená, že můžeme spalovat širokou škálu paliv jako je uhlí, biomasa či kapalná respektive plynná paliva. V diplomové práci se zabývám výpočtem a konstrukcí ohříváku parovzduchové směsi.

2. Rešerše pro flexibilní energetický systém s roštovým ohništěm

2.1 Flexibilní energetický systém (FES)

Flexibilní energetický systém slouží ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Jak již bylo zmíněno, FES kombinuje paroplynový cyklus, kdy můžeme spalovat uhlí, alternativní paliva, nebo znečištěné plynné či kapalné paliva, které nelze spalovat ve spalovacích motorech. Schéma flexibilního energetického systému je vidět na obrázku 2-1.

V diplomové práci se zabývám spalováním uhlí. Pro spalování můžeme využít všechny typy ohnišť, jak roštová, prášková tak i fluidní (stacionární i cirkulující). Toto rozdělení rozepíši v další části rešerše.

Palivo se tedy spaluje v klasické, těsné, vodou chlazené spalovací komoře. V systému FES je použita klasická spalovací komora z membránových stěn zapojených jako výparník s přirozenou cirkulací. Pára vzniklá chlazením spalovací komory se smíchá se vzduchem z kompresoru plynové turbíny a tato parovzduchová směs, je přiváděna společně se spalinami vystupující ze spalovací komory do ohříváku parovzduchové směsi (OPVS). Zde se ohřívá na teplotu cca 850 °C a následně se vede do plynové turbíny. Po expanzi v plynové turbíně se teplo odchozí parovzduchové směsi používá v kotli na odpadní teplo HRSG k výrobě páry pro Rankin – Clausiův parní cyklus. V HRSG kotli se parovzduchová směs ochladí nad teplotu rosného bodu, vzduch se zbytkovou vlhkostí se vypouští do okolí a odloučený kondenzát se vrací do chladicího okruhu chlazené spalovací komory.

2.2 Kotle, základní části kotlů, rozdělení

Kotel je komplex zařízení, který slouží k přeměně primární energie fosilních paliv, energie druhotných energetických zdrojů (DEZ) nebo energie z alternativních paliv (biomasa) na tepelnou energii pracovního média, zejména vody, respektive páry.

Jestliže se bavíme o hlavních částech kotle, máme na mysli mimo jiné tato zařízení:

Spalovací zařízení s příslušenstvím – ve spalovacím zařízení dochází ke spalování paliva. Skládá se například ze spalovací komory, hořáků, palivového hospodářství, ohříváku vzduchu, zařízení k odvodu tuhých zbytků po spalování apod.

Výměňková část – zde dochází k ohřevu vody, případně k jejímu odpaření a přehřátí vzniklé páry.

Speciálním případem jsou kotle na odpadní teplo. Ty nemají spalovací zařízení a jsou řešeny pouze jako parní generátor. Využívají spaliny jako teplotnosnou látku, přicházející z cizího zdroje.

Nedílnou součástí kotle je také celá řada zařízení a přístrojů sloužící k regulaci, měření a zajištění bezpečného a spolehlivého provozu.

2.3 Rozdělení parních kotlů

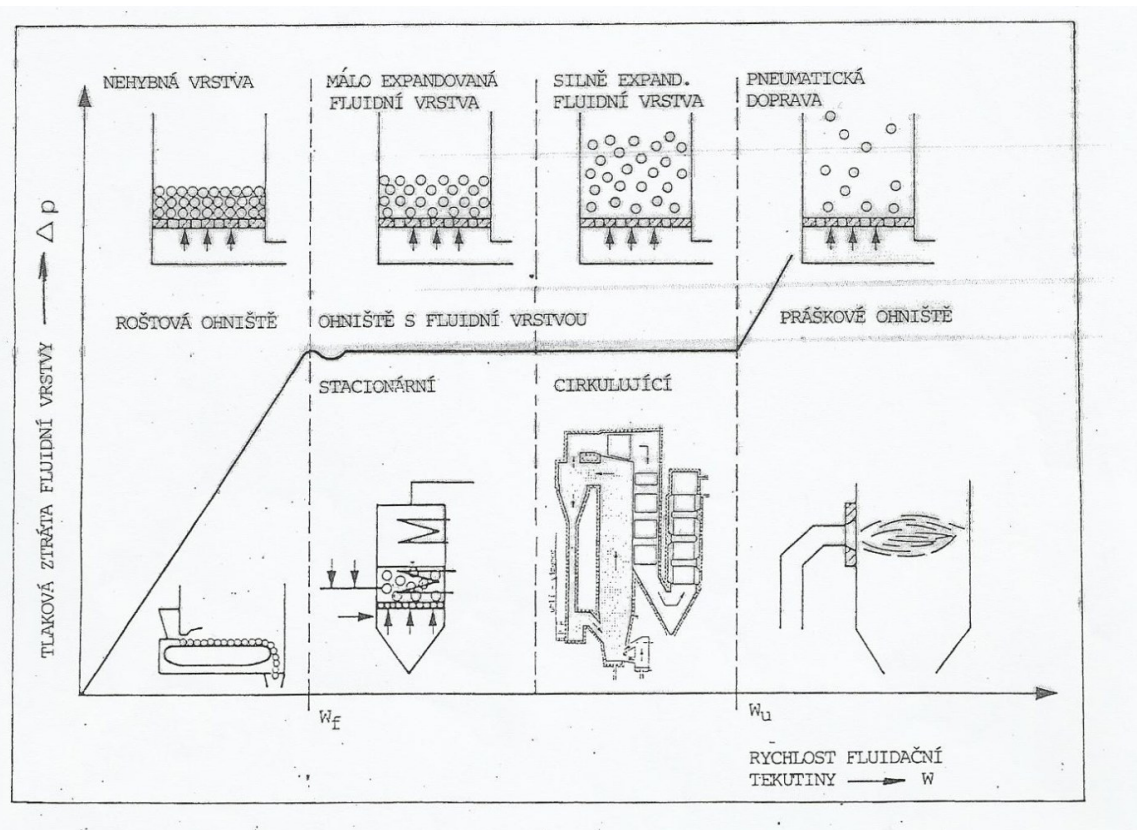
Kotle lze dělit mnoha způsoby. Například podle použití rozlišujeme kotle elektrárenské, teplárenské, kotle pro vytápění, kotle pro spalovny odpadů či kotle na odpadní teplo. Další možné rozdělení je podle konstrukce výparníku a to na velkoprostorové (válcové, plamencové, žárotrubné aj.), článkové (sekcionální), strmotrubné s přirozenou cirkulací či průtočné atd. Podle tlaku rozlišujeme kotle nízkotlaké (do 2,5 MPa), středotlaké (do 6,4 MPa), vysokotlaké (do 22,5 MPa) a nadkritické, respektive ultrakritické (do 31,5 MPa). Kotle se vyrábějí podle způsobu nasazení jako špičkové, pološpičkové a pro základní zatížení.

Z hlediska této diplomové práce je zásadní především rozdělení podle použitého paliva a druhu ohniště. V tomto ohledu rozlišujeme kotle na tuhá, kapalná a plynná paliva. Pokud hovoříme o rozdělení ohnišť, máme na mysli ohniště roštová, fluidní a prášková.

2.4 Rozdělení ohnišť podle rychlosti proudění plynu

Obrázek 2-2 popisuje závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti fluidační tekutiny. To si lze představit tak, že na roštu leží vrstva zrnitého materiálu a pod rošt

přivádíme fluidační tekutinu, v tomto případě vzduch. Čím je větší rychlost fluidační tekutiny, tím narůstá tlaková ztráta zrnitého materiálu na roštu Δp , až dosáhneme tzv. prahové rychlosti fluidace w_f . Po dosažení této rychlosti začínají částice materiálu fluidovat a vzniká fluidní vrstva, kdy jsou částice materiálu v rovnováze. V této chvíli zůstává tlaková ztráta Δp konstantní, i pokud zvyšujeme rychlost fluidační tekutiny do té doby, dokud nedosáhneme rychlosti w_u , která představuje prahovou rychlost úletu. Zde začíná tzv. oblast pneumatické dopravy, která je charakteristická pro prášková ohniště. Pokud i nadále zvyšujeme rychlost, opět dochází k nárůstu tlakové ztráty Δp .



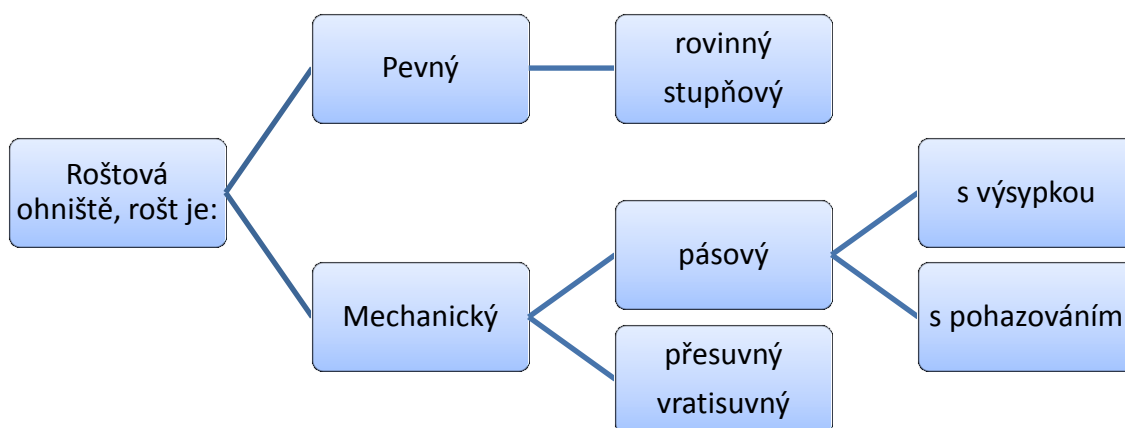
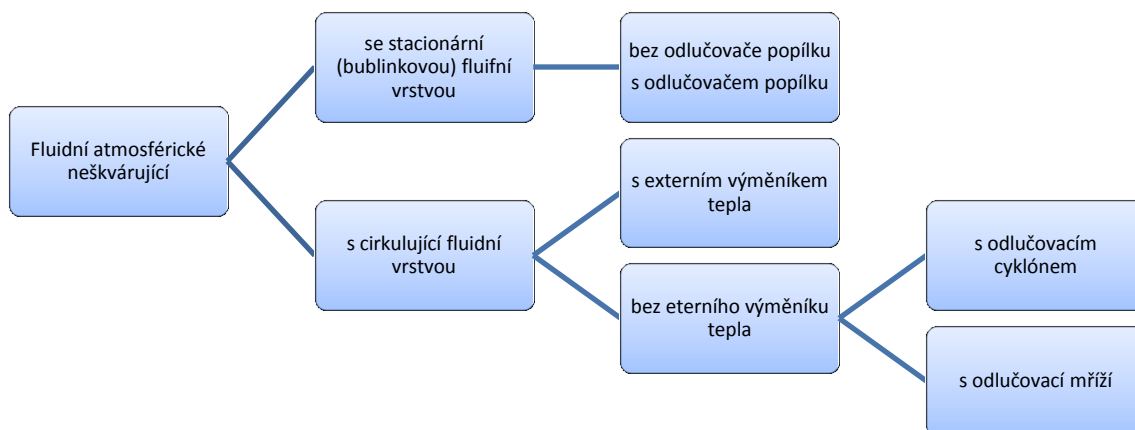
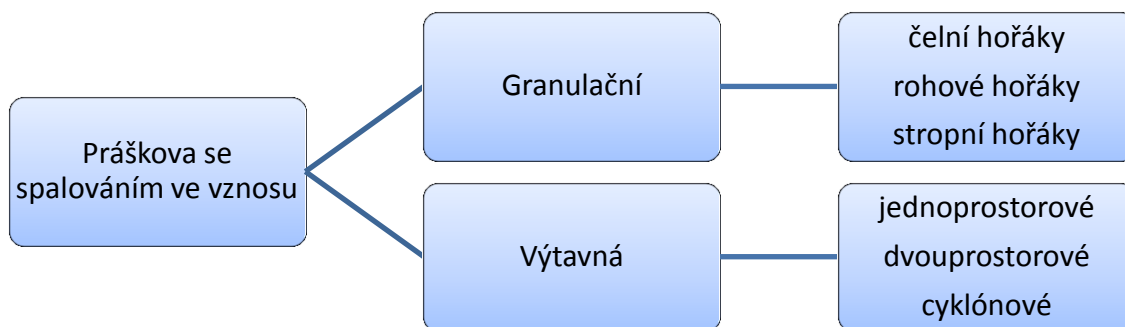
Obr. 2-2 Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti fluidační tekutiny [1]

Obrázky pod křivkou reprezentují jednotlivé typy ohnišť. Pokud je rychlost fluidační tekutiny w menší než prahová rychlost fluidace w_f jedná se o roštová ohniště. Fluidní ohniště leží mezi prahovou rychlostí fluidace w_f a prahovou rychlostí úletu w_u . Jestliže je rychlost fluidační tekutiny větší než prahová rychlost úletu w_u , hovoříme o práškových ohništích.

2.5 Rozdělení kotlů dle používaného paliva a typu ohniště.

Jak bylo zmíněno výše, tak v kotlích lze spalovat tuhá, kapalná a plynná paliva. Z hlediska této diplomové práce je zásadní spalování pevných paliv. Takováto paliva spalujeme buď v práškových, fluidních či v roštových ohništích.

Rozdělení kotlů pro spalování tuhých paliv dle typu ohniště [1]:



2.6 Prášková ohniště se spalováním ve vzosu.

Charakteristické pro tato ohniště je to, že se palivo mele na velmi jemnou frakci. To znamená, že uhelný prášek má daleko větší měrný povrch než u tříděného uhlí. Spalování probíhá rychleji (0,5 – 2 s). Pro porovnání - u roštových ohnišť je tato doba zhruba 15 až 20 minut. Největší nevýhodou práškových ohnišť se spalováním ve vzosu je úprava uhlí na prášek. Tato úprava probíhá v mlýnech. Rozeznáváme mlýny ventilátorové (hnědé uhlí), tlukadlové, trubnaté a kladkové. Další funkcí mlýnu je sušení paliva. U paliv s větším podílem vody se suší spalinami. V palivu, kde je vody obsaženo méně, dostčuje sušení vzduchem. Tyto mlýny spotřebovávají značnou část vyráběné energie, a proto se snižuje účinnost celého zařízení a jsou investičně velmi nákladné. Takto namletý uhelný prášek se fouká buď přímo do hořáku ohniště, nebo se skladuje v zásobníku uhelného prášku.

Při spalování uhelného prášku dochází ke změně popelové bilance. To znamená, že velká část popeloviny odchází se spalinami ve formě popílku (cca 60%), proto se kladou vysoké nároky na následné odprašovací zařízení. Například u roštových ohnišť odchází největší část ve formě škvára a méně jako popílek unášený spalinami.

Důležitým faktorem těchto ohnišť je teplota, při které probíhá spalování. Pokud spalujeme při relativně nižších teplotách, kdy teplota spalování nepřekročí teplotu tečení popelovin, odchází z výsypky spalovací komory popelovina v tuhé podobě a to jako škvára. Pokud naopak spalování probíhá za vyšších teplot a teplota překročí teplotu tečení, pak se popelovina ze spalovací komory odvádí ve formě tekuté strusky. Podle tohoto kritéria rozdělujeme kotle s práškovým ohništěm na výtavné a granulační.

2.6.1 Kotle s výtavným ohništěm [1, 4].

Typické pro tato ohniště je menší vychlazení plamene, takže teplota ve spodní části ohniště v oblasti plamene je vyšší než teplota tání popeloviny spalovaného uhlí. Popelovina se působením vysokých teplot roztaví a z ohniště se odvádí v tekutém stavu. Výtavné ohniště mají mírně skloněné dno s otvory pro výtok strusky do granulační nádrže, která je naplněná vodou. V nádrži se struska rychle ochladí a rozpadne se na tzv. struskový písek, který se dále dopravuje na složiště.

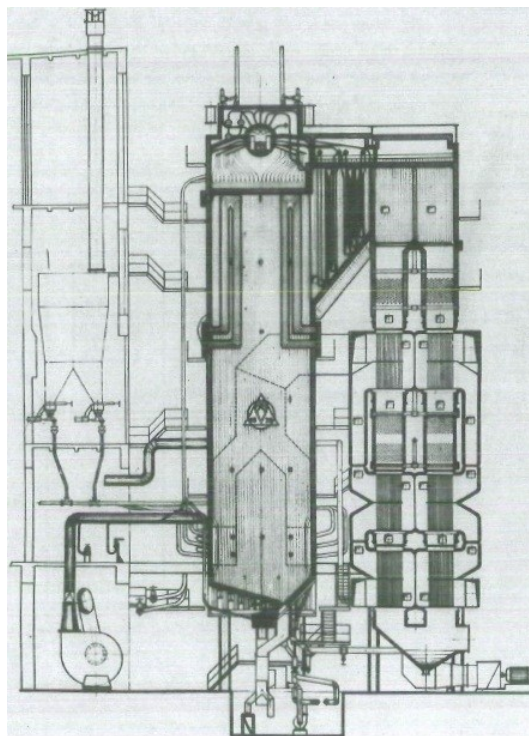
Vyšších teplot ve spalovací komoře lze dosáhnout těmito způsoby [5]:

- Spalováním vhodného paliva. V těchto topeništích se spalují kvalitní černá uhlí s velkou výhřevností.
- Chlazení stěn spalovací komory není tak intenzivní. Ve výtavném prostoru jsou stěny opatřeny vyzdívkou.
- Palivo se mele na jemnější frakci.
- Zvýšením teploty spalovacího vzduchu.
- Spalování probíhá s nižším přebytkem vzduchu.

Výtavné ohniště se skládá z výtavného prostoru a z vychlazovacího prostoru. Výtavný prostor slouží z větší části k ukončení spalování a dochází v něm k záchytu (40 – 70%) popeloviny, která se odvádí v tekutém stavu. Stěny výtavného prostoru jsou omazány žáruvzdornou keramickou hmotou. Na stěnách se nalepuje struska, která má funkci izolantu a zabraňuje přestupu tepla do okolí. Tloušťka struskové vrstvy se upravuje samovolně. Zvětšuje se či zmenšuje se tak, aby povrchová teplota odpovídala teplotě tečení popela. Vychlazovací prostor slouží k vychlazení spalin, tak aby se unášená frakce popeloviny (30 – 60%) nezačala nalepovat na teplosměnné plochy kotle.

a) Kotle s výtavným jednoprostorovým ohništěm.

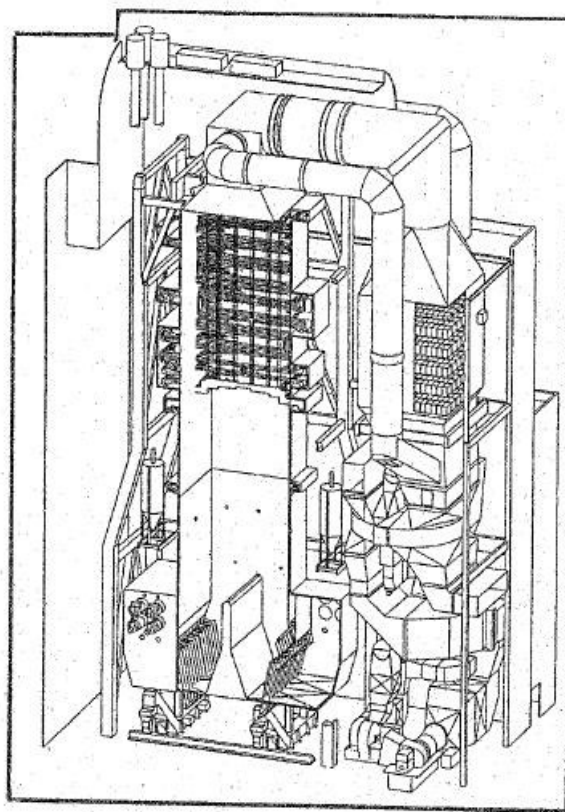
Výtavný prostor přechází plynule ve vychlazovací. To znamená, že výtavný a vychlazovací prostor není oddělen struskovou mříží jako u kotlů s dvouprostorovým ohništěm. Konstrukce bez struskové mříže je jednodušší a je podobná konstrukci kotlů s granulačním ohništěm. V jednoprostorových ohništích je možné spalovat pouze uhlí s nižší teplotou tečení popeloviny, protože se zde dosahují nižší teploty ve výtavném prostoru. Kotel s výtavným jednoprostorovým ohništěm je uveden na obrázku 2-3.



Obr. 2-3 Kotel s výtavným jednoprostorovým ohništěm [8]

b) Kotle s výtavným dvouprostorovým ohništěm (obr. 2-4).

Konstrukce takového kotle je specifická tzv. struskovou mříží, která odděluje výtavný a vychlazovací prostor. Mříž je tvořena střídavě vyhnutými trubkami výparníku, tak aby mezi nimi vznikla mezera pro průtok spalin. Trubky jsou otrněny a pokryty žáruvzdornou keramickou hmotou jako stěny výtavného prostoru. Strusková mříž ovlivňuje sálání z výtavného do vychlazovacího prostoru a zvyšuje zachycení popelovin v ohništi.



Obr. 2-4 Kotel s výtavným dvouprostorovým ohništěm [1]

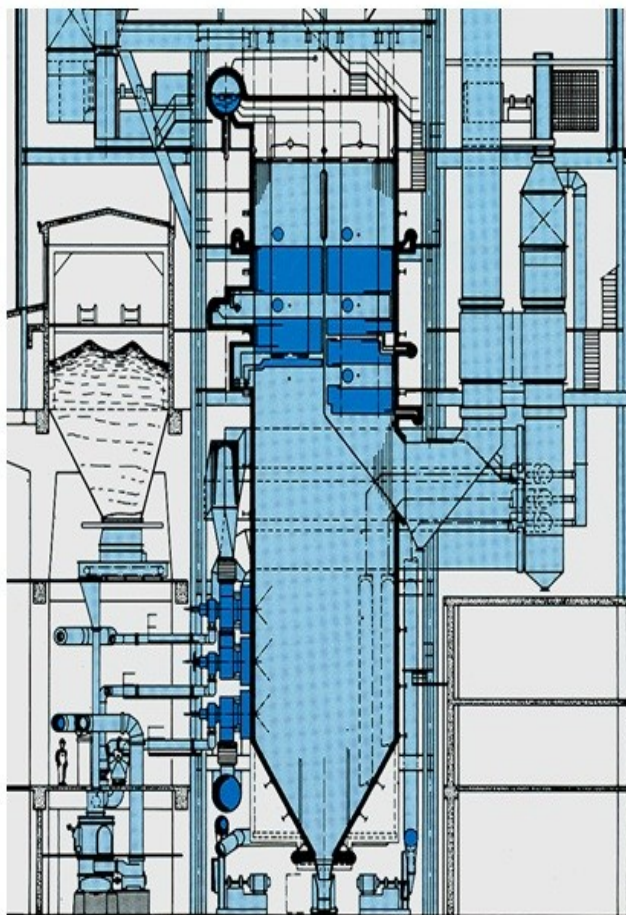
Za zmínku stojí také uvést kotle s cyklonovým ohništěm. U velkých práškových kotlů ovlivňuje rychlost spalování zejména intenzita směšování paliva s okysličovadlem. Problém nastává u velkých spalovacích prostor, kde nelze směšování tak dobře ovládat hlavně v oblastech vzdálených od hořáků. Z tohoto důvodu se vyvinula cyklonová ohniště.

Vývoj cyklonových ohnišť měl překonat některé nedostatky granulačních kotlů a zajistit zejména:

- Menší obestavěný prostor ohniště zvýšením měrného objemového zatížení.
- Zlepšení průběhu spalování v menším spalovacím prostoru.
- Nižší vlastní spotřebu elektřiny na mletí paliva spalováním drceného paliva (max. zrno 5 mm).
- Zachycení většího množství popelovin v ohništi.
- Spalování s nižším přebytkem vzduchu (cca 1,05) a z toho plynoucí zvýšení účinnosti kotle.

2.6.2 Kotle s granulačním ohništěm (obr. 2-5).

Pro tento typ ohniště je charakteristické větší vychlazení plamene tak, aby teplota v ohništi nepřesahovala teplotu tečení popeloviny a zabránilo se tak vytváření tekuté strusky a vzniku struskových nánosů na stěnách ohniště. Popelovina se tedy odvádí v tuhém stavu a to přibližně 15 až 30% jako škvára a 70 až 85% se odvádí spaliny jako popílek, který musí být ze spalin odloučen v odlučovači. Charakteristickým prvkem těchto zařízení je strusková výsypka, která uzavírá ohniště v jeho spodní části.

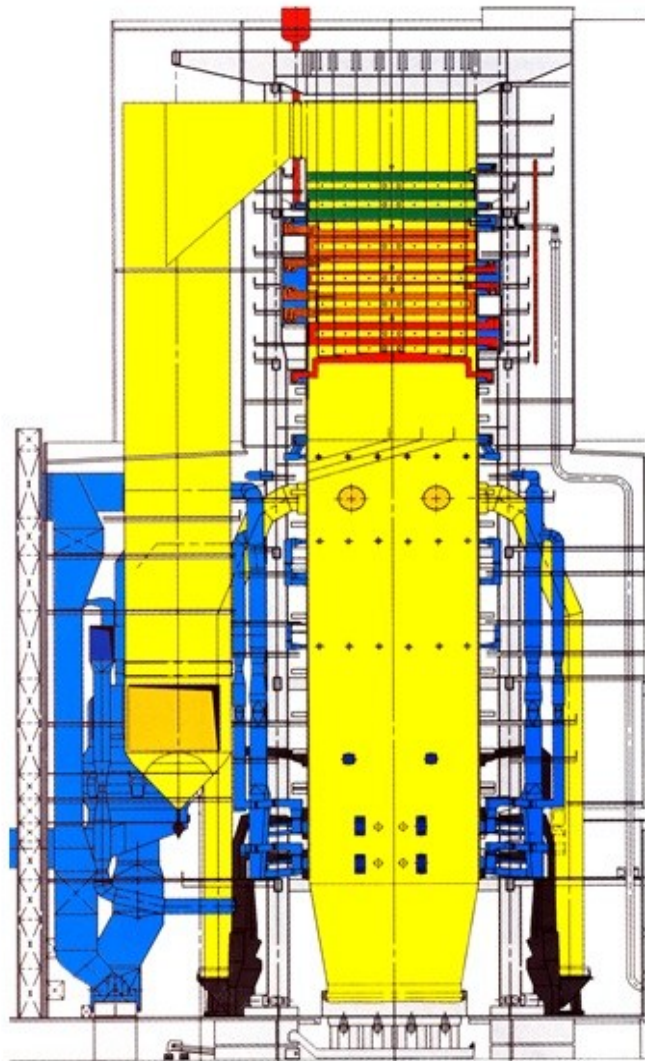


Obr. 2-5 Granulační kotel s čelními hořáky, s přirozenou cirkulací, s 1^{1/2} tahem pro spalování ČU [11]

Abychom byli schopni dodržet teplotu, při které nebude docházet k tečení popelovin, zavádíme tato opatření [5]:

- Spalování méněhodnotných paliv s nižší výhřevnosti a s vysokým podílem balastu (popel, voda).
- Větší vychlazení stěn spalovací komory. Stěny spalovací komory nejsou opatřeny vyzdívkou.
- Spalování probíhá s vyšším přebytkem spalovacího vzduchu, nebo můžeme zvolit nižší teplotu předehřátí vzduchu.
- Zavedení recirkulovaných spalin zpět do spalovací komory.

Kotle s granulačním ohništěm se dělí podle typu a uspořádání hořáků. Hořáky mohou být umístěny na svislých stěnách nebo na stropu ohniště. Podle uspořádání hořáků rozlišujeme kotle s čelními hořáky, rohovými (tangenciálními) hořáky a se stropními hořáky. Průřez ohniště, počet a uspořádání hořáků musí být provedeno tak aby se plamen nedotýkal stěn ohniště. Věžový granulační kotel s tangenciálními hořáky je vidět na obrázku 2-6.



*Obr. 2-6 Granulační kotel věžový
s tangenciálními hořáky pro spalování HU [11]*

2.7 Spalování tuhých paliv ve fluidní vrstvě.

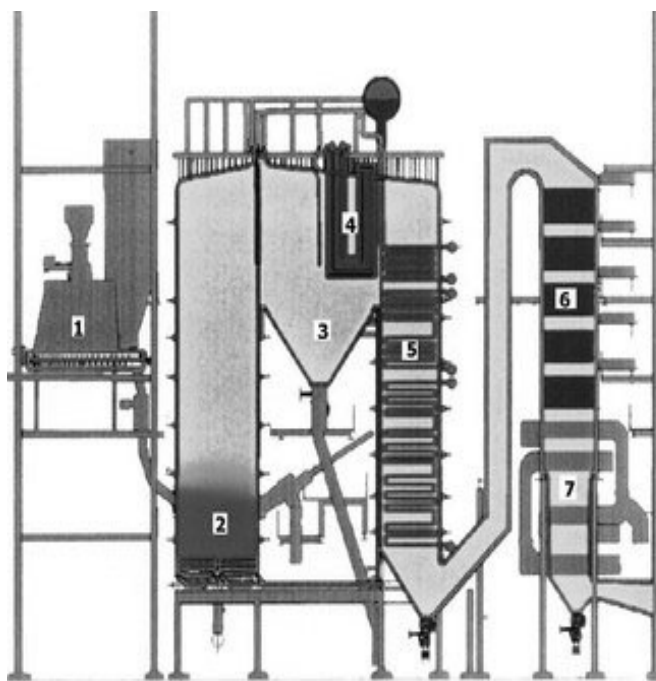
V těchto ohništích lze spalovat stejný rozsah paliv jako u kotlů s roštovým nebo práškovým ohništěm. O spalování ve fluidní vrstvě hovoříme, pokud rychlost fluidačního média překročí prahovou rychlost fluidace a zároveň není rychlost fluidačního média vyšší než prahová rychlost úletu viz. obrázek 2-2. K rozšíření těchto kotlů došlo až v padesátých letech, zejména kvůli snaze o větší intenzifikaci přestupu tepla a hmoty ve fluidní vrstvě.

Základní rozdělení kotlů podle fluidní vrstvy je vidět na obr. 2-2 a podle tohoto hlediska rozlišujeme:

- Kotle s fluidním ohništěm se stacionární (bublinkovou) fluidní vrstvou.
- Kotle s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou.

2.7.1 Kotle s fluidním ohništěm se stacionární (bublinkovou) fluidní vrstvou (obr. 2-7).

Podle teploty fluidní vrstvy dělíme topeniště se stacionární fluidní vrstvou na škvárující a neškvárující. Charakteristickým znakem škvárujících ohnišť je vyšší teplota fluidní vrstvy než teplota měknutí popelovin spalovaného paliva. Částice popeloviny se ve fluidní vrstvě spékají a z ohniště se odvádí ve formě škváry např. kotel IGNIFLUID. U neškvárujících ohnišť je teplota fluidní vrstvy nižší, než je teplota měknutí popeloviny. Částice popeloviny se nespékají a vypouští se ze dna nebo z hladiny fluidní vrstvy jako tekutina.



Obr. 2-7 Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou [5]

Typické pro tato ohniště je nižší rychlost fluidační tekutiny a tím pádem i menší expanze (výška) fluidní vrstvy. Hladina fluidní vrstvy je jasně ohraničena v požadované výšce nad fluidním roštem. Z hladiny fluidní vrstvy vystupují spaliny, které vynáší i jemnou frakci popela.

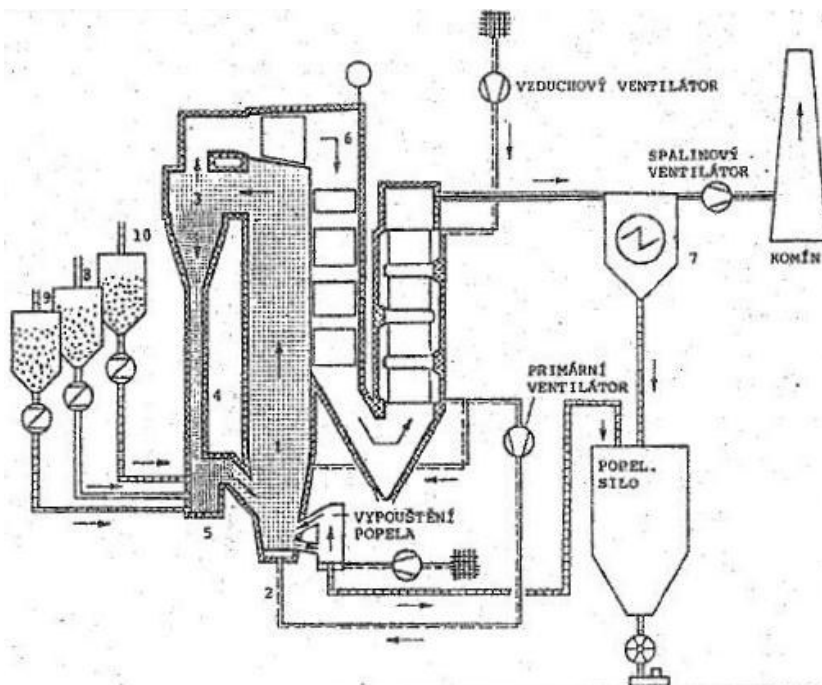
Palivo je přiváděno ze zásobníku paliva (1) do spalovací komory (2), kam je přiváděn i spalovací vzduch. Primární vzduch je dopravován pod fluidní rošt a vytváří z paliva a popřípadě aditiva či inertního materiálu fluidní vrstvu. Spaliny znečištěné popílkem odchází dohořivací komorou (přívod sekundárního vzduchu) do mezitahu (3), kde je odloučena velká část tuhého úletu. Popílek se odvádí na úložiště, nebo se s výhodou vrací v některých případech do spalovací komory (2) kvůli dohoření zbytkového uhlíku. Spaliny dále prochází teplosměnnými plochami kotle, čili přehřívákem (4,5), ohřívákem vody (6) a ohřívákem vzduchu (7).

2.7.2 Kotle s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou.

Jestliže hovoříme o fluidním kotli s cirkulující fluidní vrstvou, znamená to, že fluidní vrstva vyplňuje celou výšku ohniště. Horní hranici fluidní vrstvy netvoří hladina, ale je

určena odlučovacím zařízením (většinou cyklonem), v němž se fluidní vrstva rozdělí, na materiál fluidní vrstvy tzn. popel, aditivum a eventuálně částečně vyhořelé palivo a na spaliny obsahující i neodloučenou jemnou frakci popele, která proudí přes teplosměnné plochy kotle, odlučovače popílku a dále do komína.

Cit. [1] Spalovací komora (1) je ve spodní části zúžená do tvaru trychtýře, v jehož spodní části je upraven fluidní rošt pro přívod primárního vzduchu (2). Nad fluidním roštem se vytváří silně expandovaná fluidní vrstva po celé výšce spalovací komory. Pod



stropem spalovací komory vstupuje fluidní vrstva do odlučovacího cyklonu (3).

Obr. 2-8 Princip ohniště s cirkulující fluidní vrstvou [1]

Odloučený materiál fluidní vrstvy se vede svodkou do fluidního uzávěru (5), který tlakově odděluje spodní část spalovací komory (přetlak) od odlučovacího cyklonu, kde se udržuje mírný podtlak. Spaliny s jemnou frakcí materiálu fluidní vrstvy proudí přes druhý tah kotle, kde jsou usazeny teplosměnné plochy kotle tedy přehříváky, ohřívák vody a ohřívák vzduchu do odlučovače prachu (7) a dále do komína.

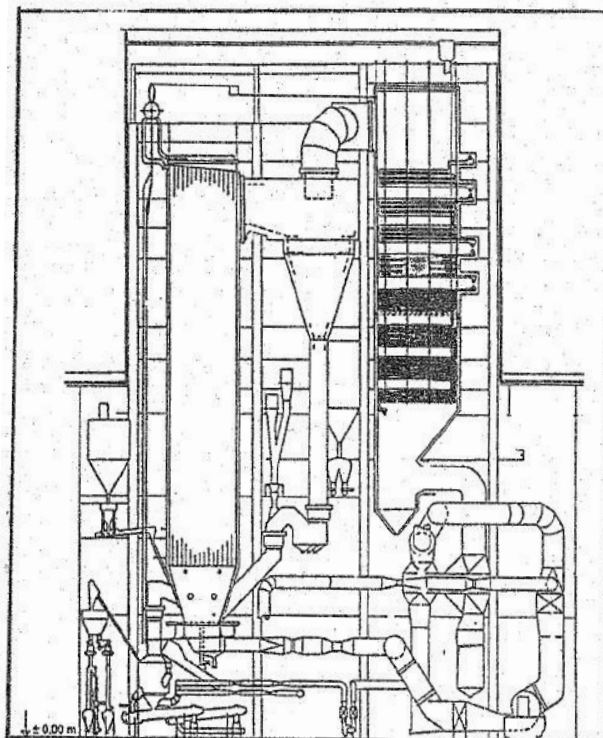
Uhlí se do spalovací komory dopravuje nejčastěji mechanicky systémem dopravníků a podavačů z uhlého bunkru (8). Kromě uhlí se do spalovací komory přivádí pneumatically i aditivum pro odsiřování spalin ze sila (9). Pro první najetí kotle (v ohništi není materiál fluidní vrstvy) se provede s cizím materiálem a to konkrétně pískem nebo popelem, který je připraven v zásobníku (10). Při odstavení kotle, kdy se musí z ohniště vypustit materiál fluidní vrstvy je k dispozici silo (10), do něhož se přečerpá materiál fluidní vrstvy z ohniště. Při najíždění se naopak materiál fluidní vrstvy přečerpá do spalovací komory. Princip ohniště s cirkulující fluidní vrstvou je vidět na obrázku 2-8.

Provedení fluidních kotlů s cirkulující fluidní vrstvou lze rozdělit na několik typů:

- a) Kotle s fluidním ohništěm bez externího výměníku tepla.
- b) Fluidní kotle s modifikovaným odlučovačem bez externího výměníku tepla.
- c) Fluidní kotle s odlučovací mříží bez externího výměníku tepla.
- d) Kotle s fluidním ohništěm s externím výměníkem tepla.

ad a) Kotle s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou bez externího výměníku tepla (obr. 2-9).

Princip je obdobný jako na obr. 2-8. V ohništi (1) se nad fluidním roštem vytváří cirkulující fluidní vrstva, která vstupuje do cyklonu (3). Zde se odloučí materiál fluidní vrstvy od spalin a svodkou (4) se vede přes fluidní uzávěr (5) zpět do spalovací komory. Spodní část spalovací komory je zúžená do tvaru trychtýře, pod který se přivádí primární spalovací vzduch (2). Sekundární vzduch se přivádí



Obr. 2-9 Fluidní kotel s klasickým cyklonem bez externího výměníku tepla [1]

v několika úrovních nad sebou po celé výšce trychtýřovité části

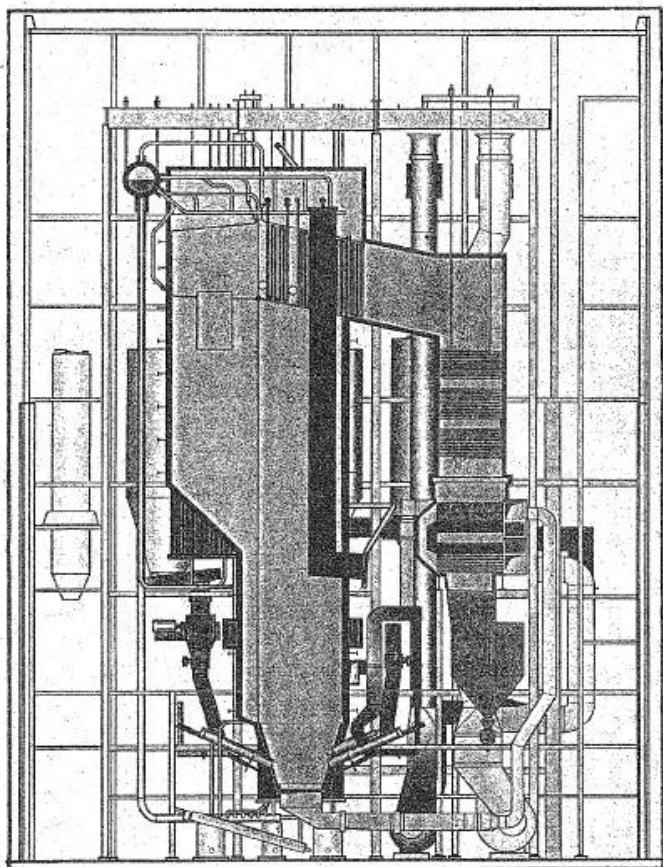
spalovací komory. Stěny spalovací komory jsou konstruovány klasicky jako plynotěsné, membránové a jsou zapojeny jako výparník kotle. V oblasti trychtýře ve spodní části jsou stěny vyzděny žáruvzdornou vyzdívkou. Dále je vyzděn i odlučovací cyklon, svodka a fluidní uzávěr. Teplota fluidní vrstvy se udržuje na požadované hodnotě změnou rozdělení přívodu vzduchů v trychtýřovité části ohniště.

Rozeznáváme dvojí typ cirkulace popela a to externí cirkulaci přes cyklon a interní cirkulaci, která probíhá ve spalovací komoře. Ve spodní trychtýřovité části dochází k intenzivní cirkulaci po výšce trychtýře a hmotnostní průtok dosahuje hodnoty až 17 000 kg/s. Při porovnání s množstvím přivedeného paliva, které může být např. 38,5 kg/s vyplývá, že fluidní vrstvu tvoří z naprosté většiny částice cirkulujícího popela o různé velikosti. Jemnější frakce popela obíhá přes odlučovací cyklon, hrubší frakce se zúčastňuje

inertní cirkulace. Pokud změním rozdělení přívodu vzduchu po výšce trychtýřovité části, tak se bude měnit i hmotnostní průtok i velikost unášených částic do vyšších částí ohniště. Hrubší frakce se po dosažení požadované výšky vrací zpět podél stěn spalovací komory a zajišťuje přestup tepla z nechlazené fluidní vrstvy v trychtýřovité části do stěn po celé výšce spalovací komory.

ad b) Fluidní kotel s modifikovaným odlučovačem a bez externího výměníku tepla (obr. 2-10).

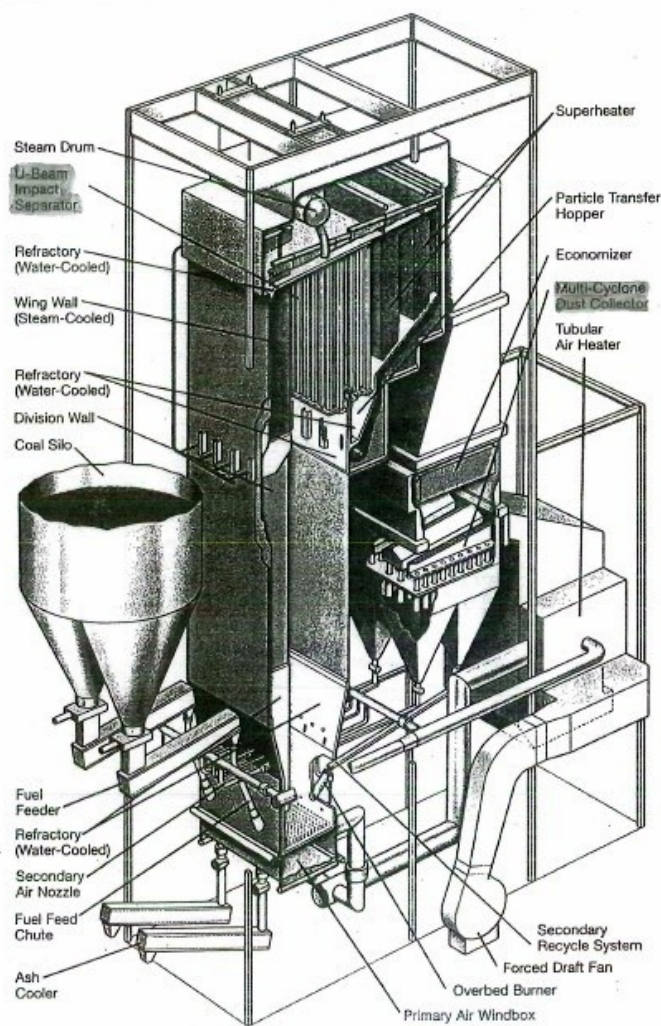
Kotel nemá samostatně umístěn odlučovací cyklon, ale odlučovací prostor je tvořen v jednom tělese se spalovací komorou, od níž je oddělen mezistěnou. Stěny odlučovacího prostoru jsou plynotěsně svařené, membránové stěny. Fluidní vrstva ze spalovací komory protéká svislým obdélníkovým otvorem v dělicí stěně pod stropem do odlučovacího prostoru. K odloučení větší části materiálu fluidní vrstvy dochází převážně změnou směru proudění a spaliny s jemnou frakcí jsou odváděny do konvekčního tahu kotle. Hrubá frakce se svislými kanály na dělicí straně vrací nad fluidní rošt.



Obr. 2-10 Fluidní kotel s modifikovaným odlučovačem bez externího výměníku tepla [1]

ad c) Fluidní kotel s odlučovací mříží bez externího výměníku tepla (obr. 2-11).

Kotel vychází z konstrukce klasického práškového dvoutahového kotle. Dno je vytvořeno jako fluidní rošt. Fluidní vrstva silně expanduje až pod strop spalovací komory a do vodorovného spojovacího tahu proudí přes odlučovače materiálu fluidní vrstvy, které jsou provedeny jako odlučovací mříž z U profilů. Hrubší částice fluidní vrstvy se vracejí zpět do spodní části spalovací komory (primární okruh). Spaliny s jemnou frakcí proudí dále přes konvekční tah kotle, kde se další část fluidní vrstvy odloučí v tzv. multicyklonu. Ten je řazen mezi ohřívákem vody a ohřívákem vzduchu. Odloučený materiál se vede zpět do spalovací komory (sekundární okruh).

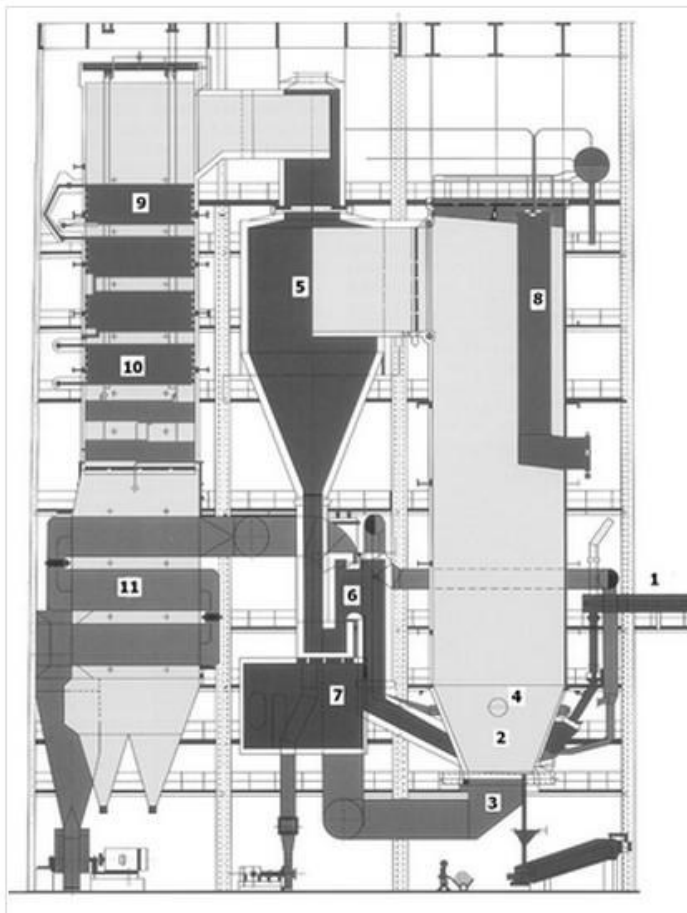


Obr. 2-11 Fluidní kotel s odlučovací mříží bez externího výměníku tepla [8]

ad d) Kotel s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou a s externím výměníkem tepla (obr. 2-12).

Princip takovéto konstrukce spočívá v tom, že v ohništi (2) vytvoříme silně expandovanou fluidní vrstvu, která pod stropem kotle vstupuje do odlučovacího cyklonu (5). Zde se odloučí materiál fluidní vrstvy od spaliny, které pokračují s jemnou frakcí popela do dalších teplosměnných ploch kotle. Odloučený materiál se z cyklonu vede svodkou do fluidního uzávěru (6).

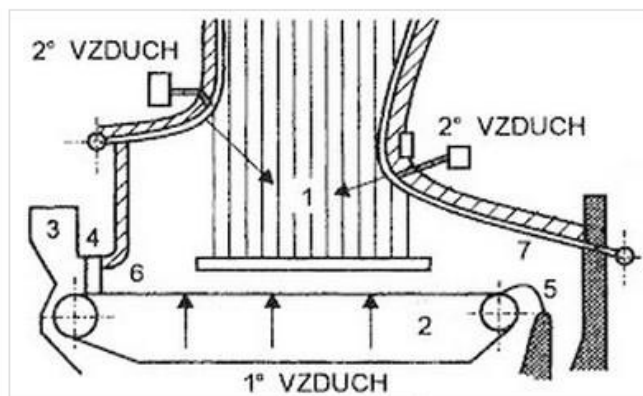
V této části dochází k rozdělení odloučeného materiálu fluidní vrstvy speciálním jehlovým ventilem. Část materiálu se vede přímo do spalovací komory a část se dopravuje do externího výměníku tepla (7), kde se ochladí např. na 600°C a teprve poté se vrací zpět do spalovací komory. Změnou poměru materiálu vraceného do spalovací komory a materiálu vedeného do výměníku se mění tepelná bilance spalovací komory a společně se změnou množství primárního (3) a sekundárního (4) vzduchu lze takto účinně ovlivňovat teplotu ve spalovací komoře.



Obr. 2-12 Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou a externím výměníkem tepla [5]

2.8 Roštová ohniště.

Spalování na roštu je nejstarším a nejjednodušším způsobem spalování tuhých paliv. Základní části roštového ohniště jsou patrné z obrázku 2-13. Ohniště (1) je ohraničeno roštem (2), přední a zadní klenbou (6) a (7) a stěnami ohniště. Palivo se přivádí na rošt ze zásobníku (3). Výška vrstvy paliva se nastavuje hradítkem (4). Pevný zbytek po spalování se odvádí přes tzv. škvárový jízec (5) do škvárové výsypky. Popelovou bilanci u těchto kotlů tvoří z 60 až 70% škvára. Zbytek se odvádí se spalinami ve formě popílku.



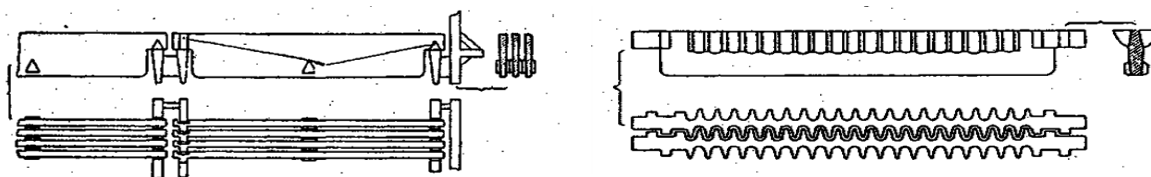
Obr. 2-13 Části roštového ohniště [1]

Rošt musí být navržen tak, aby vytvářel a udržoval vrstvu paliva požadované tloušťky. Je potřeba aby zajišťoval přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst roštu tak, aby spalování probíhalo s optimálním přebytkem vzduchu. Po roštu dále požadujeme, aby umožnil vysoušení paliva, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření paliva a v neposlední řadě musí umožňovat regulaci tepelného výkonu.

2.8.1 Kotle s pevným roštem

Palivo vyhořívá v původní nasypané vrstvě a zbytky po spalování se odstraňují ručně. Jsou určeny pro nejmenší výkony a v dnešní době už nenachází využití.

a) Rovinný rošt

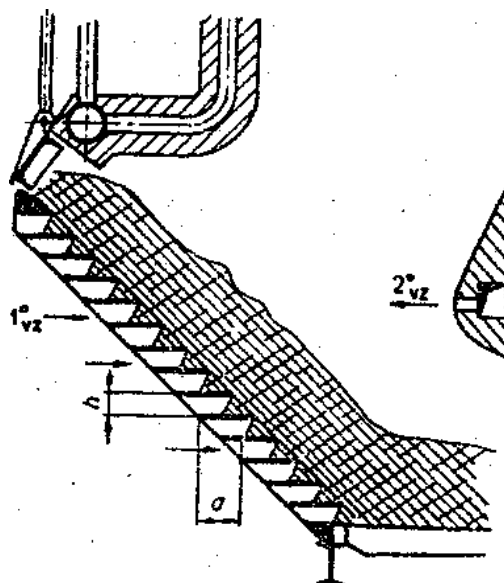


Obr. 2-14 Pevný rovinný rošt [1]

Na obrázku vlevo je rošt sestavený ze štíhlých nosníků s nálytky. Mezi deskami jsou mezery pro přívod vzduchu. Desky jsou vyrobeny ze žárovečné litiny a jsou chlazené spalovacím vzduchem. Proto je snaha o co největší povrch roštnic tak, aby byl zaručený dostatečný odvod tepla. I proto se začali využívat litinové roštnice, které jsou po obou stranách zvlněné jak je vidět na obrázku vpravo. Po sestavení roštnic vznikne vlnitá mezera a tím pádem se výrazně zvýší povrch roštnice a dochází k lepšímu chlazení roštnic.

b) Stupňový rošt

Konstrukce tohoto roštu je tvořena dvěma částmi a to ze vstupní (šikmé) části, kterou tvoří stupňový rošt a z výstupní (rovné) části, kterou tvoří rovinný rošt. Stupňový rošt je proveden z litinových roštnic ve tvaru stupňů. Výška h a přesah a se volí tak, aby nedocházelo k propadu paliva. Vrstva paliva se vlivem gravitace sesouvá dolů a postupně vyhořívá zejména prchavá hořlavina. Zbytek hořlaviny dohořívá až na rovinném roštu.



Obr. 2-15 Stupňový rošt [1]

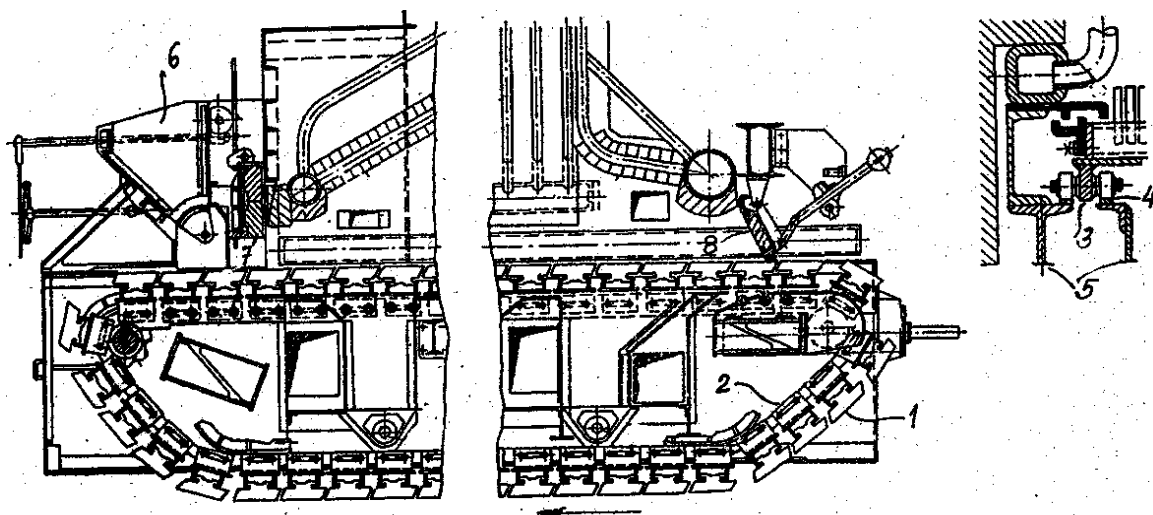
2.8.2 Kotle s mechanickým roštem

Palivo se na roštu posouvá, prohrabuje, postupně vyhořívá a zbytky po spalování se odvádí mechanicky.

a) Pásový rošt

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů mechanických roštů. Vznikl jako modifikace řetězového roštu, který byl prvním typem mechanického roštu. Velkou nevýhodou řetězových roštů bylo to, že roštnice tvořily široké články Gallova řetězu a při poškození roštnice se musel rozebrat celý řetěz. Proto se u pásového roštu používá Gallův řetěz pouze jako tažný a nosný prvek a s rozžhaveným palivem nedojde ke kontaktu.

Roštnice (1) jsou zasunuty do příčných trámčů (2), které jsou navařeny na články řetězů (3). Aby nedocházelo k prohýbání řetězu, je na každém čepu kladka (4), která se odvaluje po nosném rámu (5) po stranách roštu.

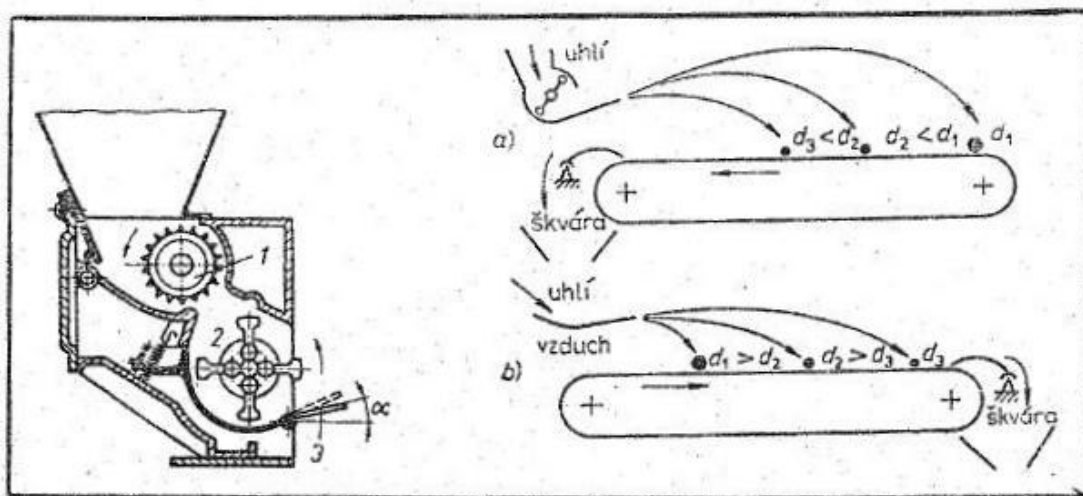


Obr. 2-16 Pásový rošt bez pohazování paliva [1]

Z výsypky (6) se paliva sesouvá na rošt. Výška vrstvy paliva se nastavuje hradítkem (7). Na konci roštu je tzv. škrabák (8), který zadržuje škváru, aby dohořela, a zároveň zabráňuje přísátí falešného vzduchu do ohniště.

Moderní pásové rošty jsou sestaveny z modulů, kde má každý modul tzv. šupinové roštnice uložené ve speciálních držácích na řetězech. To znamená, že roštnice lze vyměnit i za provozu kotle. Kotel je uložen na bočních nosnících tělesa roštu. Rozvod primárního spalovacího vzduchu se reguluje regulačními klapkami, tak aby spalování probíhalo s optimálním přebytkem vzduchu.

V některých případech se pásové rošty vybavují pohazovacím zařízením, zejména pokud se spaluje palivo s větším obsahem prachu. Pohazovací zařízení je umístěno pod výsypkou paliva nad roštem a může být mechanické, pneumatické či parní.



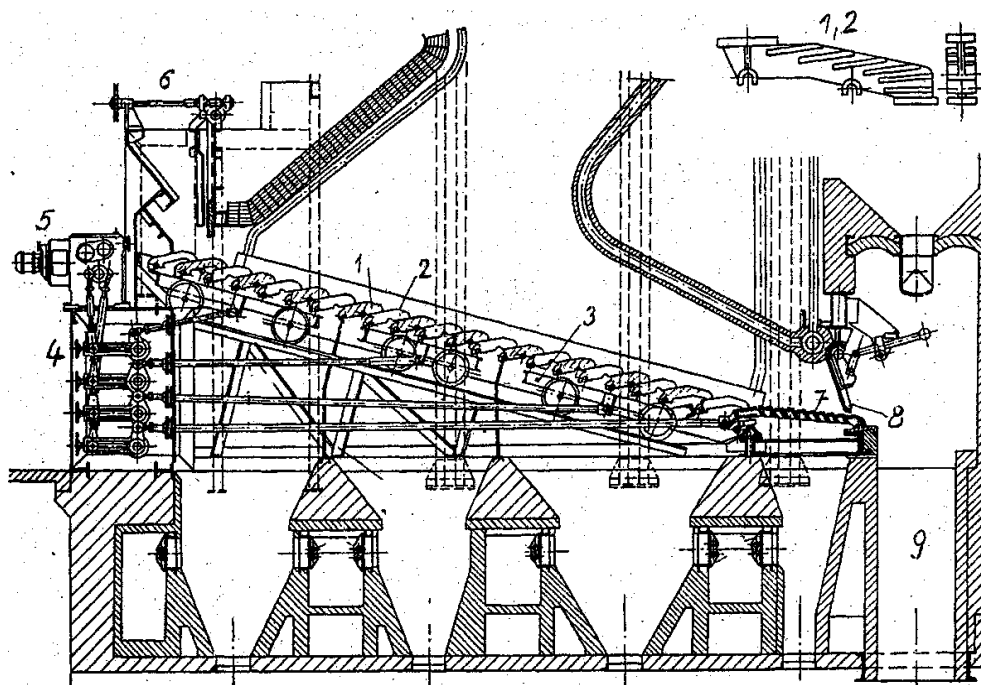
Obr. 2-17 Pásový rošt s pohazováním paliva [1]

Na obrázku 2-17 vlevo je uveden mechanický pohazovač paliva. Podavač (1) dopravuje palivo do pohazovače (2). Trajektorie dráhy pohazovaného uhlí se nastavuje deskou (3). Podle způsobu pohazování se mění směr pohybu roštu a umístění škvárové výsypky.

Na obrázku 2-17 a) je znázorněn mechanický pohazovač. Při tomto způsobu pohazování dopadají největší částice paliva dále od pohazovače. Menší frakce dopadá blíže k pohazovači. Aby došlo k vyhoření i větších částic uhlí, musí se rošt posouvat zprava směrem k pohazovacímu zařízení, pod kterým je umístěna i škvárová výsypka. Při pneumatickém pohazování obrázek 2-17 b) dopadá hrubá frakce paliva blíže k pohazovacímu zařízení, kdežto jemná frakce uhlí dopadá do vzdálenější oblasti od pohazovače. Z toho vyplývá, že rošt se pohybuje od pohazovacího zařízení směrem doprava. Na konci roštu je umístěna škvárová výsypka.

b) Přesuvný rošt

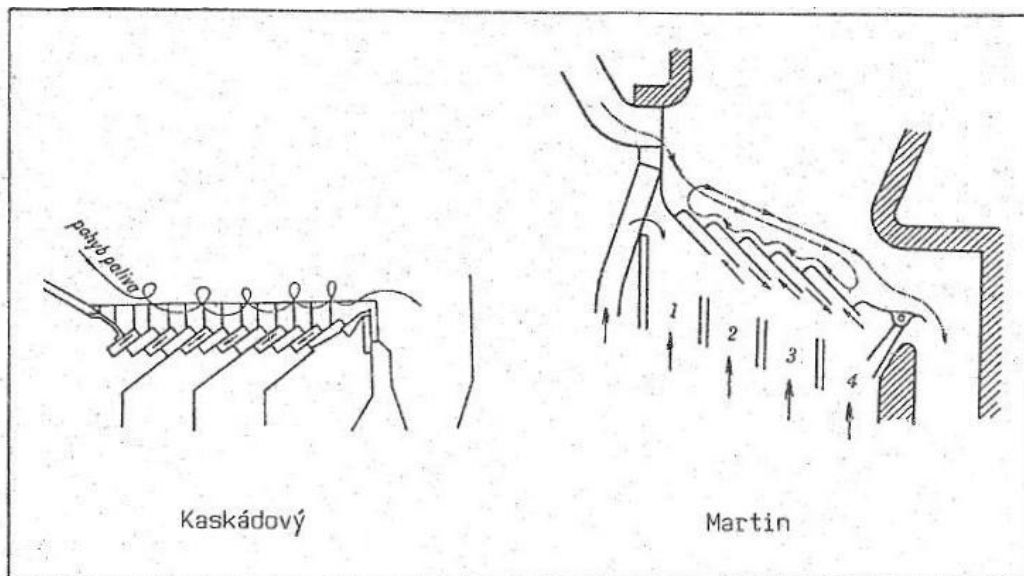
Jedná se o rozšířený typ mechanického roštu. Tento rošt je vhodné zvolit zejména tam, kde se spaluje uhlí s větším podílem prachu a se sklonem ke spékání. Jedná se vlastně o stupňový rošt, jehož plocha je sestavena z roštnic (1) a (2). Většinou bývají všechny sudé stupně (1) připevněné na pevně k nosnému rámu, kdežto liché stupně (2) jsou po



Obr. 2-18 Přesuvný rošt [1]

skupinách připevněny k vozíkům (3), které vynucují střídavý pohyb roštnic ve vodorovném směru. Vozíky bývají poháněny klikovým mechanismem (4) buďto elektromotorem nebo hydraulicky (5). Uhlí se z výsypky (6) dopravuje na rošt a pohybem roštu se palivo jednak přesouvá, prolamuje a částečně i promíchává. Na konci šikmého roštu je ještě vodorovný rošt (7) který je ohraničen výkyvným škrabákem (8), který opět zabraňuje přísávání falešného spalovacího vzduchu. Z dohořivací části roštu (7) padá škvára do škvárové výsypky (9).

c) Vratisuvný rošt



Obr. 2-19 Vratisuvný rošt [1]

Tento typ roštu dosahuje intenzivnějšího prolamování vrstvy a promíchávání paliva ve vrstvě. Vratisuvné rošty mohou být dvojí konstrukce a to buď kaskádové či typu Martin. Konstrukce těchto roštů je podobná jako u roštu přesuvného. Rozdíl je jen ve směru pohybu roštnice. Roštnice se pohybují proti směru toku paliva nebo napříč toku paliva. Díky tomu se vytváří zpětný nebo příčný pohyb paliva.

Vratisuvný rošt typu Martin má skloněný povrch ve směru od vstupu paliva směrem ke škvárové výsypce, ale roštnice se pohybují proti toku paliva. Spodní žhavá vrstva se vrací ke vstupu paliva a přes tuto vrstvu přepadává nové palivo. Tímto lze dosáhnout jednoduššího zapálení, palivo zůstává déle na roštu a dochází k dobrému promísení a prohoření vrstvy paliva.

U kaskádového vratisuvného roštu je povrch vodorovný a doba setrvání paliva na roštu je kratší než u typu Martin. Roštnice mají příčný pohyb a v tomto směru se také palivo nejvíce promíchává.

Pro nejvhodnější použití jednotlivých typů ohnišť viz. výše existuje celá řada faktorů, ale nejdůležitějšími jsou vlastnosti spalovaného paliva, čímž se myslí jeho složení, fyzikální a chemické vlastnosti, vlastnosti popeloviny atd. I když se v určitých etapách vývoje jeví některé systémy perspektivní či na ústupu, po jejich modernizaci není možné upřednostňovat určitý typ ohniště a je třeba na ně nahlížet jako na doplňující se. Jako příklad lze uvést roštové ohniště, které může dosahovat výkonu např. 200 t/h, při splnění emisních limitů s běžnými parametry páry např. 13,6 MPa a 535°C a nelze tedy tvrdit, že

roštová ohniště, jsou určeny jen pro kotle nízkých výkonů. Z hlediska spalování, ochrany životního prostředí a vynaložených nákladů se pro daný výkon, parametry paliva, provozní podmínky a emisní limity musí zvolit nejvhodnější technologie pro každý jednotlivý projekt.

U systému FES je zvolena koncepce roštového ohniště, které dodržuje emisní limity NO_x a CO tzv. primárními opatřeními případně s doplněním o metodu selektivní nekatalytické redukce SNCR. Pro splnění emisních limitů SO_2 je k dispozici jednoduchá suchá aditivní metoda odsiřování v ohništi kotle a lze tedy využít veškeré výhody roštových kotlů a to zejména:

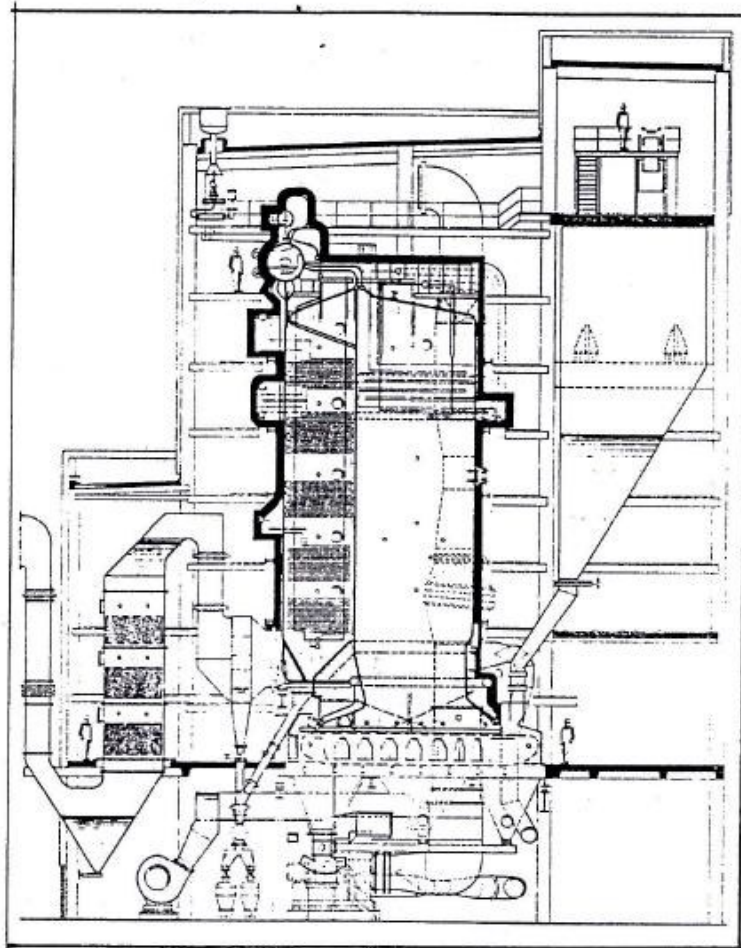
- palivo lze spalovat bez předchozí úpravy (sušení, mletí) → nízká vlastní spotřeba
- možnost spalovat uhlí v širokém rozsahu parametrů
- jednoduchá obsluha a údržba
- kotel má příznivé vlastnosti i při nižších výkonech → velký regulační rozsah
- vysoká spolehlivost
- nízké pořizovací a provozní náklady

Firma Vítkovice Power Engineering dodává kotle s roštovým ohništěm samonosné konstrukce, kdy je kotel uložen na konstrukci roštu. Stěny kotle jsou řešeny jako plynotěsné, membránové a buben kotle je usazen na trubkách zadní stěny kotle. Kotle jsou typové konstrukce, to znamená, že se využívá osvědčená koncepce provedení a detailů kotle. Rozměry kotle se určují podle požadovaných parametrů a podle druhu spalovaného uhlí. Kotle jsou dodávány s parametry páry pro kogenerační jednotky dle potřeby. Některé provozní hodnoty parních kotlů jsou uvedeny v tabulce.

Provozní data	Jednotka	Roštové ohniště		
		Přesuvný rošt	Pásový rošt	
			s výsypkou	s pohazováním
Max.výkon ohniště	MW_t	95	140	190
Parní výkon cca	t/h	100	150	200
Plocha roštu max.	m^2	72	96	78
Regulační rozsah	%	30 - 100	15 - 100	20 - 100
Zchycení popela	%	60 - 75	60 - 75	30 - 50

Tab. 2-1 Orientační data roštových kotlů

Na obr. 2-20 je uveden roštový kotel o výkonu 100 t/h. Kotel spaluje černé uhlí o zrnění do 32 mm. Uhlí se dopravuje přes výsypku na rošt. V samostatném třetím tahu je ohřívák vody z žebrovaných trubek, před ním je ve vodorovném kanálu za kotlem řazen mechanický odlučovač prachu, který má odlučivost cca 50%. V přední stěně spalovací komory jsou umístěny dýzy pro aditivní odsíření spalín.



Obr. 2-20 Roštový kotel o výkonu 100 t/h [8]

3. Výpočet struskování, kontrola výhřevnosti a stanovení stechiometrie zadaného paliva

3.1 Struskování [2]

Jestliže spalujeme palivo obsahující popel, tak se nelze vyhnout tvorbě nánosů. Tyto nánosy lze rozdělit:

- popílkové - na konvekčních plochách.
- struskové - na teplosměnných plochách a stěnách ohniště. Jsou to pevně lpící usazeniny, které vznikají změknutím nebo částečným roztavením popelovin při vysokých teplotách.

Nánosy mohou mít velmi těžké důsledky pro funkci ohniště, ale i pro funkci tlakového systému kotle. Proto je nutné vznik nánosů řídit např. vhodnou volbou ohniště a jeho provozováním nebo je nutné kotel vybavit zařízením pro čištění ploch za provozu. Nejčastěji se používají různé typy ostříkovačů a ofukovačů.

Všeobecně se uvádí, že na termoplastické vlastnosti popela má vliv poměr kyselých (A) a zásaditých oxidů (B) oxidů [2].

$$A = SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 = 43,74 + 28,58 + 1,04 = 73,36$$

$$\underline{A = 73,36 [-]} \quad (3.1)$$

$$B = Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O = 9,17 + 4 + 2,73 + 1,12 + 2,96 = 19,98$$

$$\underline{B = 19,98 [-]} \quad (3.2)$$

$$S^d = \frac{S^r}{(1 - W^r)} \cdot 100 = \frac{0,005}{(1 - 0,09)} \cdot 100 = 0,54$$

$$\underline{S^d = 0,54 [\%]} \quad (3.3)$$

Kritéria pro posuzování náchylnosti paliva k tvoření popelových nánosů:

- Tvorba struskových nánosů:

$$R_s = \frac{B}{A} \cdot S^d = \frac{19,98}{73,36} \cdot 0,54 = 0,15$$

$$\underline{R_s = 0,15 [-]} \quad (3.4)$$

b) Tvorba popílkových nánosů:

$$R_p = \frac{B}{A} \cdot Na_2O = \frac{19,98}{73,36} \cdot 1,12 = 0,31$$

$$\underline{R_p = 0,31 [-]} \quad (3.5)$$

Náchylnost paliva k tvorbě nánosů se posuzuje podle tabulky 3-1.

Náchylnost popele k tvorbě nánosů	Struskových (v ohništi) R_s	Popílkových (konvekční tah) R_p
Slabá	< 0,6	< 0,2
Střední	0,6 – 2,0	0,2 – 0,5
Velká	2,0 – 2,6	0,5 – 1,0
Velmi velká	> 2,6	> 1,0

Tab. 3-1 Náchylnost paliva k tvorbě nánosů [2]

Z tabulky 3-1 vyplývá, že pro námi zadané palivo je tvorba struskových nánosů slabá proto neuvažují, že spalovací komora bude vybavena ostříkovači. Tvorba popílkových nánosů je střední takže i v tomto případě neuvažují vybavit teplosměnné plochy za spalovací komorou čištěním ploch, ale ve stěnách kotle budou vyhotoveny otvory pro dodatečnou instalaci čistícího zařízení, pokud by si to provoz vyžadoval.

V následující kapitole popisují dva pro mě nevhodnější typy čištění teplosměnných ploch a to je čištění pomocí parních ofukovačů a pulzní čištění tlakovým vzduchem pokud by byla potřeba tyto plochy čistit.

3.2 Odstraňování nánosů v kotli [6]:

K odstraňování nánosů z teplosměnných ploch lze využít nejrůznějších systémů. Tyto systémy se v zásadě rozdělují na:

a) Za provozu kotle:

- 1) Parní ofukovače
- 2) Akustické čištění
- 3) Vodní ostříkování
- 4) Kuličkový déšť
- 5) Mechanický oklep

b) Při odstavení kotle

- 1) Mechanické čištění
- 2) Čištění kotle řízeným výbuchem

3.2.1 Parní ofukovače:

Jsou to mechanická zařízení ovládané automaticky, které odstraňují nánosy, jako jsou saze, struska a popel z teplosměnných ploch kotle. Nánosy jsou odstraňovány pomocí vysokotlaké páry buď vlastní výroby, nebo z cizího zdroje.

Na obrázku 3-1 lze vidět rotační parní ofukovač. Ten pracuje tak, že nejprve ofukovač vjede do kotle do pracovní polohy. Následně je do něj přivedena pára a ofukovač pokračuje v pohybu, otáčí se a pára ofukuje teplosměnnou plochu. Je důležité s ofukovačem pohybovat i když jsou teplosměnné plochy čisté (v tom případě bez páry) aby byl zajištěn volný pohyb ofukovače.



Obr. 3-1 Rotační parní ofukovač [11]

Počet parních ofukovačů závisí hlavně na velikosti kotle, spalovaném palivu, dále závisí na koncepci teplosměnných ploch a předchozích zkušenostech. Není vhodné příliš časté čištění teplosměnných ploch z důvodů většího odběru vlastní páry a možnosti zvýšeného výskytu koroze ploch. Jak již jsem uvedl výše, pára do ofukovačů se přivádí vlastní nebo z cizího zdroje. V redukční stanici se její parametry upraví zhruba na teplotu 310 °C a tlak 2,2 MPa.

Výhody:

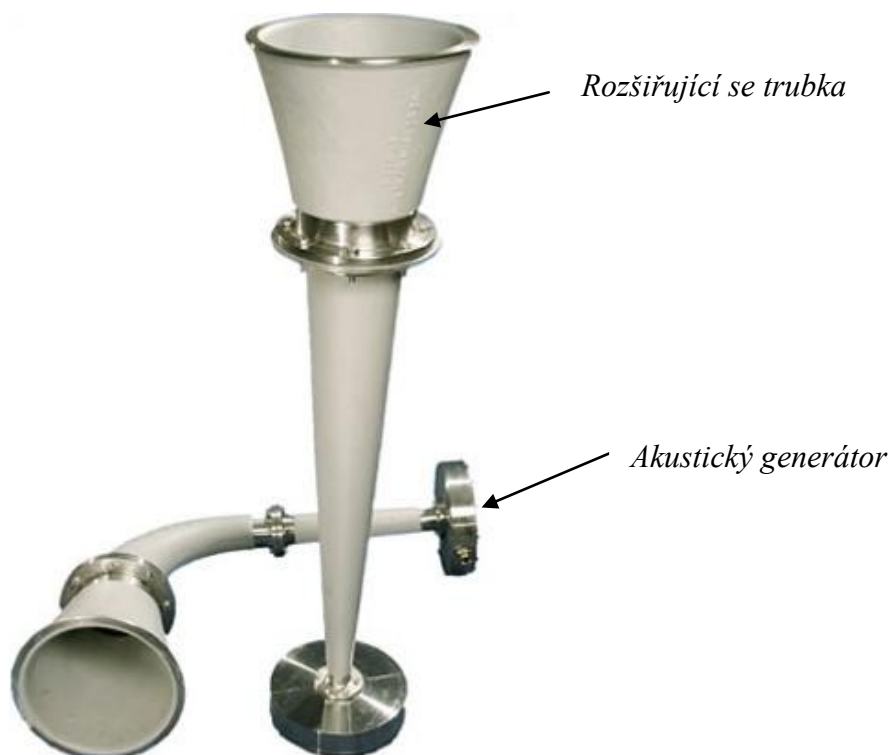
- Nejrozšířenější způsob čištění teplosměnných ploch
- Jednoduchý a automatizovaný provoz

Nevýhody:

- Ovlivňuje rosný bod spalin
- Zvyšuje se vlastní odběr páry
- Zvyšuje intenzitu abraze trubek
- Náročnější provozní údržba zařízení → vyšší provozní náklady

3.2.2 Pulzní čištění tlakovým vzduchem (Nirafon) [6,7]:

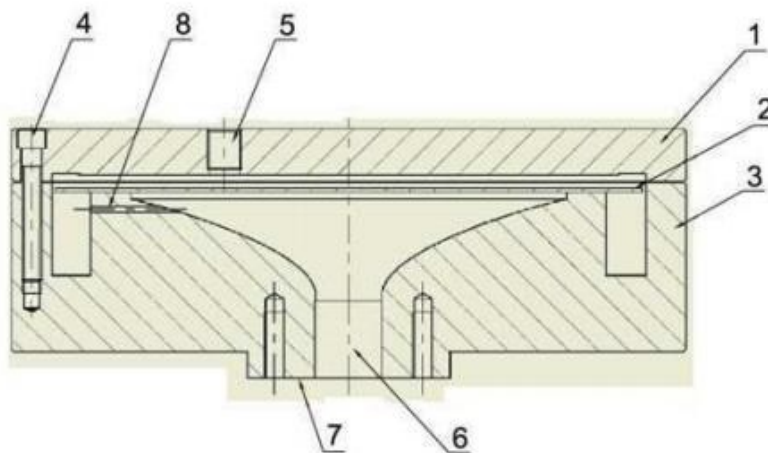
Akustický systém čištění (Nirafon) odstraňuje nánosy z povrchu teplosměnných ploch pomocí akustického ‚šoku‘. Ty jsou vytvářeny pomocí pneumaticky řízených akustických měničů. Frekvence zvukových vln se pohybuje od 100 do 250 Hz. Tato energie rezonuje a uvolňuje usazené nánosy. Tyto akustické šoky se opakují v cyklech, dokud není dosaženo požadovaného výsledku čištění.



Obr. 3-2 Akustické jednotky [7]

Akustická jednotka se skládá ze dvou částí a to z akustického generátoru a rozšiřující se trubky (slouží k uchycení ke stěně kotle) viz. obrázek 3-2. Podle typu akustické jednotky se pohybuje hodnota pracovního tlaku od 0,5 do 0,8 MPa. Odebírané množství vzduchu je v provozním stavu 20 až 40 l/s. V neprovozním stavu je odebírané množství vzduchu 1 až 2 l/s. V této fázi dochází k ochlazování membrány, aby nedošlo k jejímu poškození. Pokud by vzduchová síť nebyla schopna zajistit tyto průtoky vzduchu, dodávají se s akustickými jednotkami tlakové zásobníky. Při těchto parametrech je hodnota akustického zvuku přibližně 150 dB. Spolu s akustickou jednotkou se dodává i příslušenství jako je filtr, kterým prochází vzduch a na němž se zachycují pevné nečistoty, odkalovací ventil, kde se vzduch zbavuje přebytečné vlhkosti, manometry, kulové kohouty apod.

Akustický generátor včetně jeho částí je vidět na obrázku 3-3. Skládá se ze tří hlavních částí, kterými jsou víko generátoru (1), membrána (2), tělo generátoru (3) a dalších pomocných zařízení jako jsou spojovací šrouby (4) přívod a odvod vzduchu (5,6), připojovací příruba (7) a otvor pro chladicí vzduch (8). Firma Nirafon vyrábí akustické generátory z materiálu SS 2343 [7].



Obr. 3-3 Akustický generátor [6]

Množství akustických jednotek závisí zejména na velikosti a množství ploch, na kterých v důsledku spalovacího procesu ulpívá popílek. Musí být rozmístěny tak, aby nedocházelo díky fázovému posunu k vyrušení frekvence zvukových vln. Při instalaci se každá jednotka ladí zvlášť.

Výhody:

- Neovlivňují rosný bod spalin
- Nezvyšuje intenzitu abraze trubek
- Široké rozmezí působnosti
- Lze odstranit nánosy i z těžko dostupných míst
- Nízké pořizovací a provozní náklady
- Jednoduché zařízení → spolehlivé

Nevýhody:

- U kotlů spalujících biomasu není odstraňování nánosů efektivní
- Potřeba vybudovat přívody a zdroj pracovního vzduchu
- Náročné vyladění jednotek

Pro roštový kotel o výkonu 120 MW_t, jak ho má ve své koncepci flexibilního energetického systému zvolený firma VPE a zadaného paliva, bych doporučoval k čištění za provozu kotle pulzní čištění tlakovým vzduchem, které neovlivňuje rosný bod spalin, nezvyšuje intenzitu abraze trubek a nespotřebovává vlastní páru. Tento systém je jednoduchý a spolehlivý a má nízké pořizovací a provozní náklady.

3.3 Kontrola stanovení výhřevnosti:

Kontrola výhřevnosti paliva se provádí porovnáním kalorimetricky stanovené výhřevnosti a výhřevnosti stanovenou z prvkového rozboru podle Mendělejova vzorce. Rozdíl těchto dvou výhřevností nesmí být větší než ± 630 kJ/kg pro paliva s obsahem popele v bezvodém stavu menší než 25%. Pokud má palivo obsah popele v sušině větší než 25% může být výhřevnost vypočtená podle Mendělejova vzorce větší než výhřevnost stanovená kalorimetricky o 840 kJ/kg, ale nesmí být nižší. Zároveň s výhřevností je nutné kontrolovat také maximální poměrný objem tříatomových plynů. Maximální poměrný objem těchto plynů musí být shodný s hodnotami uvedenými v tabulce 3-2. V opačném případě je potřeba korigovat prvkový rozbor.

Palivo	Max. poměrný objem tříatomových plynů [%]
Černá uhlí	18,4 – 19,0
Hnědá uhlí a lignity	18,8 – 19,3
Antracity a poloantracity	19,0 – 20,0
Těžké topné oleje	16,2 – 16,7

Tab. 3-2 Doporučené hodnoty maximálního poměrného objemu tříatomových plynů pro pevná a kapalná paliva [2]

Kontrola výhřevnosti původního paliva:

Kalorimetrická výhřevnost: $Q_i^{r(k)} = 23000 \text{ kJ/kg}$

Mendělejevův vzorec:

$$Q_i^{r(M)} = 339 \cdot C^r + 1030 \cdot H^r - 109 \cdot (O^r - S^r) - 24,5 \cdot W^r$$

$$Q_i^{r(M)} = 339 \cdot 61,06 + 1030 \cdot 3,13 - 109 \cdot (7,21 - 0,5) - 24,5 \cdot 9 = 22971,35$$

$$\underline{Q_i^{r(M)} = 22971,35 \text{ [kJ/kg]}} \quad (3.6)$$

Rozdíl výhřevností:

$$Q_i^{r(v)} = Q_i^{r(k)} - Q_i^{r(M)} = 23000 - 22971,35 = 28,65$$

$$\underline{Q_i^{r(v)} = 28,65 \text{ [kJ/kg]}} \quad (3.7)$$

Přepočet popeloviny na suchý stav:

$$A^d = \frac{A^r}{(1 - W^r)} \cdot 100 = \frac{0,18}{(1 - 0,09)} \cdot 100 = 19,78$$

$$\underline{A^d = 19,78 \text{ [%]}} \quad (3.8)$$

Kontrola výhřevnosti vyhovuje.

Kontrola maximálního poměrného objemu tříatomových plynů:

$$\omega_{RO2,max} = \frac{21}{(1 + \beta)} = \frac{21}{(1 + 0,086)} = 19,33$$

$$\underline{\omega_{RO2,max} = 19,33 \text{ [%]}} \quad (3.9)$$

Korekční součinitel β :

$$\beta = \frac{2,37 \cdot (H^r - 0,125 \cdot O^r)}{C^r + 0,375 \cdot S^r} = \frac{2,37 \cdot (0,0313 - 0,125 \cdot 0,0721)}{0,6106 + 0,375 \cdot 0,005} = 0,0862$$

$$\underline{\beta = 0,086 [-]} \quad (3.10)$$

Protože doporučené hodnoty maximálního poměrného objemu tříatomových plynů jsou pro černé uhlí v rozmezí 18,4 – 19,0 % viz. tab. 3-2, je nutná korekce prvkového rozboru.

Kontrola maximálního poměrného objemu tříatomových plynů nevyhovuje.

Korekce prvkového rozboru:

	Původní palivo [%]	Upravené palivo [%]
<u>C^r</u>	61,06	59,06
<u>O^r</u>	7,21	8,21
<u>H^r</u>	3,13	4,13

Tab. 3-3 Korekce prvkového rozboru

Kontrola výhřevnosti upraveného paliva* :

Kalorimetrická výhřevnost: $Q_i^{r(k)} = 23000 \text{ kJ/kg}$

Mendělejevův vzorec* :

$$Q_i^{r(M)*} = 339 \cdot C^r + 1030 \cdot H^r - 109 \cdot (O^r - S^r) - 24,5 \cdot W^r$$

$$Q_i^{r(M)*} = 339 \cdot 59,06 + 1030 \cdot 4,13 - 109 \cdot (8,21 - 0,5) - 24,5 \cdot 9$$

$$\underline{Q_i^{r(M)*} = 23214,35 \text{ [kJ/kg]}} \quad (3.11)$$

Rozdíl výhřevností* :

$$Q_i^{r(v)*} = Q_i^{r(k)} - Q_i^{r(M)*} = 23000 - 23214,35 = -214,35$$

$$\underline{Q_i^{r(v)*} = -214,35 \text{ [kJ/kg]}} \quad (3.12)$$

Kontrola výhřevnosti vyhovuje.

Kontrola maximálního poměrného objemu tříatomových plynů*:

$$\omega_{RO2,max}^* = \frac{21}{(1 + \beta)} = \frac{21}{(1 + 0,124)} = 18,68069$$

$$\underline{\omega_{RO2,max}^* = 18,68 [\%]} \quad (3.13)$$

Korekční součinitel β^* :

$$\beta^* = \frac{2,37 \cdot (H^r - 0,125 \cdot O^r)}{C^r + 0,375 \cdot S^r} = \frac{2,37 \cdot (0,0413 - 0,125 \cdot 0,0821)}{0,5906 + 0,375 \cdot 0,005} = 0,124155$$

$$\underline{\beta^* = 0,124 [-]} \quad (3.14)$$

Kontrola maximálního poměrného objemu tříatomových plynů vyhovuje.

V následujících výpočtech je třeba dosazovat hodnoty upravené.

3.4 Stechiometrické výpočty pro spalování zadaného paliva:

Stěny ohniště jsou tvořeny membránovými stěnami, kotel je samonosný a mezi roštem a membránovými stěnami nedochází k přísátí vzduchu.

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{O2,min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$O_{O2,min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,5906}{12,01} + \frac{0,0413}{4,032} + \frac{0,005}{32,06} - \frac{0,0821}{32} \right)$$

$$\underline{O_{O2,min} = 1,28 [m_N^3/kg]} \quad (3.15)$$

hmotnostní složení kyslíku ve vzduchu je 22,39%

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{VS,min} = \frac{O_{O2,min}}{0,21} = \frac{1,28}{0,21} = 6,08$$

$$\underline{O_{VS,min} = 6,08 [m_N^3/kg]} \quad (3.16)$$

objemové složení kyslíku ve vzduchu je 21%

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé vyhoření 1 kg paliva:

$$O_{VV,min} = O_{VS,min} \cdot \chi_v = 6,08 \cdot 1,014 = 6,16$$

$$\underline{O_{VV,min} = 6,16 [m_N^3/kg]} \quad (3.17)$$

Součinitel χ_v [-] zohledňuje podíl vodní páry náležící 1 m_N³ suchého vzduchu. Při konstrukčních výpočtech pro běžné klimatické podmínky lze zvolit $\chi_v = 1,014$.

Objem vodní páry v tomto objemu:

$$O_{H_2O}^V = O_{VV,min} - O_{VS,min} = 6,16 - 6,08 = 0,09$$

$$\underline{O_{H_2O}^V = 0,09 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.18)$$

V následujících výpočtech počítám s přebytkem vzduchu $\alpha = 1$ [-], tzn. stechiometricky, tedy palivu přivedu právě tolik vzduchu, aby došlo k dokonalému vyhoření paliva. Tato situace je však teoretická a ve skutečnosti se spaluje s větším přebytkem vzduchu, tak abychom se vyhnuli vysokému nedopalu paliva.

Výpočet objemů jednotlivých složek spalin, ze kterého dále počítám minimální objem spalin $O_{SS,min}$ při dokonalém vyhoření paliva s minimálním množstvím vzduchu ($\alpha = 1$, ve spalinách není žádný kyslík).

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS,min} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,5906 + 0,0003 \cdot 6,08 = 1,096$$

$$\underline{O_{CO_2} = 1,096 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.19)$$

Objem oxidu siřičitého:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,005 = 0,003$$

$$\underline{O_{SO_2} = 0,003 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.20)$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS,min} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0110 + 0,7805 \cdot 6,08 = 4,753$$

$$\underline{O_{N_2} = 4,753 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.21)$$

Objem argonu, který zahrnuje i další vzácné plyny ze vzduchu:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VS,min} = 0,0092 \cdot 6,08 = 0,056$$

$$\underline{O_{Ar} = 0,056 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.22)$$

Minimální objem suchých spalin:

$$O_{SS,min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 1,096 + 0,003 + 4,753 + 0,056 = 5,909$$

$$\underline{O_{SS,min} = 5,909 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.23)$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin:

$$O_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V =$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0413 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,09 + (0,09) = 0,656$$

$$\underline{O_{H_2O} = 0,656 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.24)$$

Minimální objem vlhkých spalin:

$$O_{SV,min} = O_{SS,min} + O_{H_2O} = 5,909 + 0,656 = 6,565$$

$$\underline{O_{SV,min} = 6,565 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.25)$$

a) Výpočet složení vlhkých spalin minimálních ($\alpha = 1$):**Množství oxidu uhličitého ve vlhkých spalinách:**

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV,min}} = \frac{1,096}{6,565} \cdot 100 = 16,70$$

$$\underline{\omega_{CO_2} = 16,70 \text{ [%]}} \quad (3.26)$$

Množství oxidu siřičitého ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SV,min}} = \frac{0,003}{6,565} \cdot 100 = 0,05$$

$$\underline{\omega_{SO_2} = 0,05 \text{ [%]}} \quad (3.27)$$

Množství dusíku ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SV,min}} = \frac{4,753}{6,565} \cdot 100 = 72,40$$

$$\underline{\omega_{N_2} = 72,40 \text{ [%]}} \quad (3.28)$$

Množství vody ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SV,min}} \cdot 100 = \frac{0,656}{6,565} \cdot 100 = 9,99$$

$$\underline{\omega_{H_2O} = 9,99 [\%]} \quad (3.29)$$

Množství argonu a dalších vzácných plynů ze vzduchu ve spalinách:

$$\omega_{AR} = \frac{O_{AR}}{O_{SV,min}} \cdot 100 = \frac{0,056}{6,565} \cdot 100 = 0,85$$

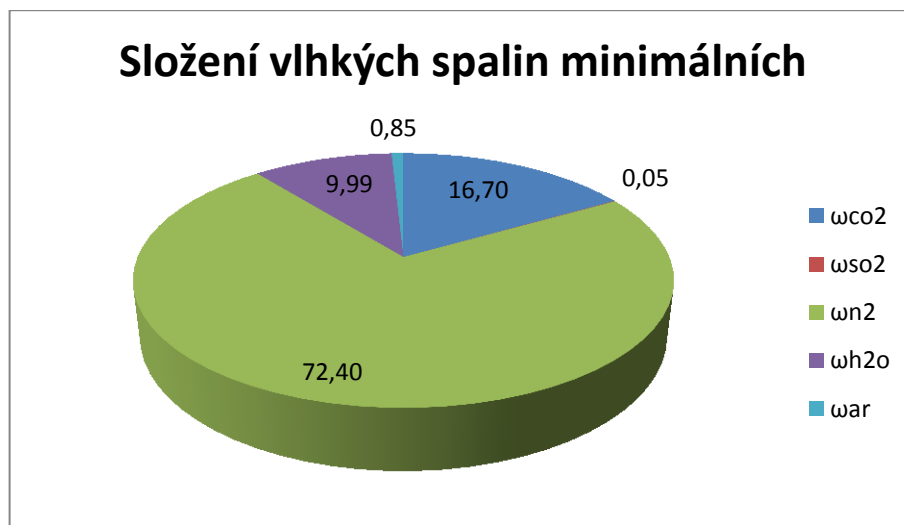
$$\underline{\omega_{AR} = 0,85 [\%]} \quad (3.30)$$

Kontrola:

$$\sum \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O} + \omega_{AR}$$

$$\sum 16,70 + 0,05 + 72,40 + 9,99 + 0,85 = 100,00$$

$$\underline{\Sigma 100,00 [\%]} \quad (3.31)$$



Obr. 3-4 Složení vlhkých spalin minimálních

b) Výpočet složení suchých spalin minimálních ($\alpha = 1$):

Množství oxidů uhličitých v suchých spalinách:

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS,min}} = \frac{1,096}{5,909} \cdot 100 = 18,56$$

$$\underline{\omega_{CO_2} = 18,56 [\%]} \quad (3.32)$$

Množství oxidu siřičitého v suchých spalinách:

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SS,min}} = \frac{0,003}{5,909} \cdot 100 = 0,06$$

$$\underline{\omega_{SO_2} = 0,06 [\%]} \quad (3.33)$$

Množství dusíku v suchých spalinách:

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SS,min}} = \frac{4,753}{5,909} \cdot 100 = 80,44$$

$$\underline{\omega_{N_2} = 80,44 [\%]} \quad (3.34)$$

Výpočet množství argonu a dalších vzácných plynů ze vzduchu v suchých spalinách:

$$\omega_{AR} = \frac{O_{AR}}{O_{SS,min}} \cdot 100 = \frac{0,056}{5,909} \cdot 100 = 0,95$$

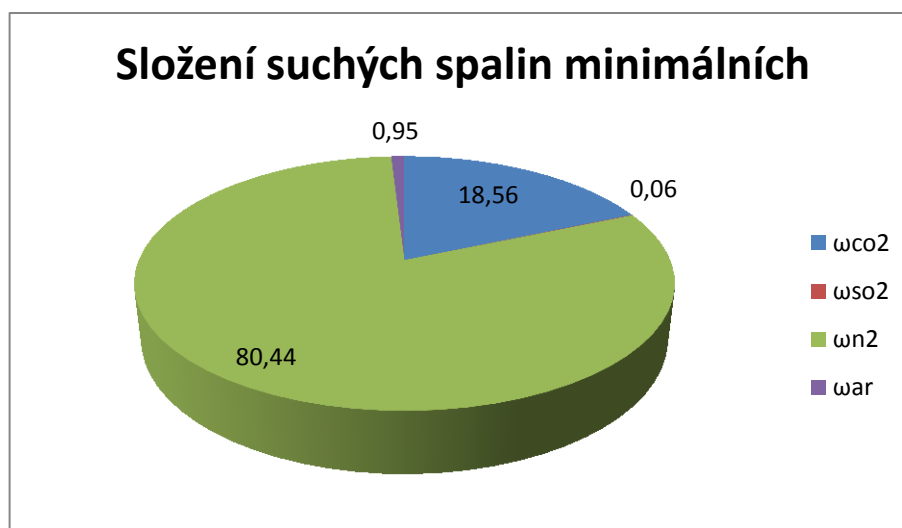
$$\underline{\omega_{AR} = 0,95 [\%]} \quad (3.35)$$

Kontrola:

$$\sum \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O} + \omega_{AR}$$

$$\sum 18,56 + 0,06 + 80,44 + 0,95 = 100,00$$

$$\underline{\Sigma = 100,00 [\%]} \quad (3.36)$$



Obr. 3-5 Složení suchých spalin minimálních

Skutečné množství suchého vzduchu:

$$O_{VS,sk} = \alpha \cdot O_{VS,min} = 1,3 \cdot 6,08 = 7,90$$

$$\underline{O_{VS,sk} = 7,90 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.37)$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu:

$$O_{VV,sk} = \chi_v \cdot O_{VS,sk} = 1,014 \cdot 7,90 = 8,01$$

$$\underline{O_{VV,sk} = 8,01 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.38)$$

Skutečné množství suchých spalin:

$$O_{SS,sk} = O_{SS,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS,min} = 5,909 + (1,3 - 1) \cdot 6,08 = 7,73$$

$$\underline{O_{SS,sk} = 7,73 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.39)$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$O_{SV,sk} = O_{SV,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV,min} = 6,565 + (1,3 - 1) \cdot 6,16 = 8,41$$

$$\underline{O_{SV,sk} = 8,41 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}} \quad (3.40)$$

c) Výpočet složení vlhkých spalin skutečných ($\alpha = 1,3$):

Množství oxidu uhličitého ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{CO_2,sk} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV,sk}} = \frac{1,096}{8,41} \cdot 100 = 13,03$$

$$\underline{\omega_{CO_2,sk} = 13,03 \text{ [%]}} \quad (3.41)$$

Množství oxidu siřičitého ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{SO_2,sk} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SV,sk}} = \frac{0,003}{8,41} \cdot 100 = 0,04$$

$$\underline{\omega_{SO_2,sk} = 0,04 \text{ [%]}} \quad (3.42)$$

Množství dusíku ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{N_2,sk} = \frac{O_{N_2}}{O_{SV,sk}} = \frac{\frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS,sk}}{O_{SV,sk}} = \frac{\frac{22,4}{28,016} \cdot 1,10 + 0,7805 \cdot 7,90}{8,41}$$

$$\underline{\omega_{N_2,sk} = 73,41 \text{ [%]}} \quad (3.43)$$

Množství kyslíku ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{O_2,sk} = \frac{O_{O_2}}{O_{SV,sk}} = \frac{(\alpha - 1) \cdot 0,21 \cdot O_{VS,min}}{O_{SV,sk}} = \frac{(1,3 - 1) \cdot 0,21 \cdot 6,08}{8,41} = 4,55$$

$$\underline{\omega_{O_2,sk} = 4,55 [\%]} \quad (3.44)$$

Množství vody ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{H_2O,sk} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SV,sk}} = \frac{\frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + (\chi_v - 1) \cdot O_{VS,sk}}{O_{SV,sk}}$$

$$\omega_{H_2O,sk} = \frac{\frac{44,8}{4,032} \cdot 4,13 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 9 + (1,014 - 1) \cdot 7,90}{8,41} = 8,10$$

$$\underline{\omega_{H_2O,sk} = 8,10 [\%]} \quad (3.45)$$

Množství argonu a dalších vzácných plynů ze vzduchu ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{AR,sk} = \frac{O_{AR}}{O_{SV,sk}} \cdot 100 = \frac{0,0092 \cdot O_{VS,sk}}{O_{SV,sk}} \cdot 100 = \frac{0,0092 \cdot 7,90}{8,41} \cdot 100 = 0,86$$

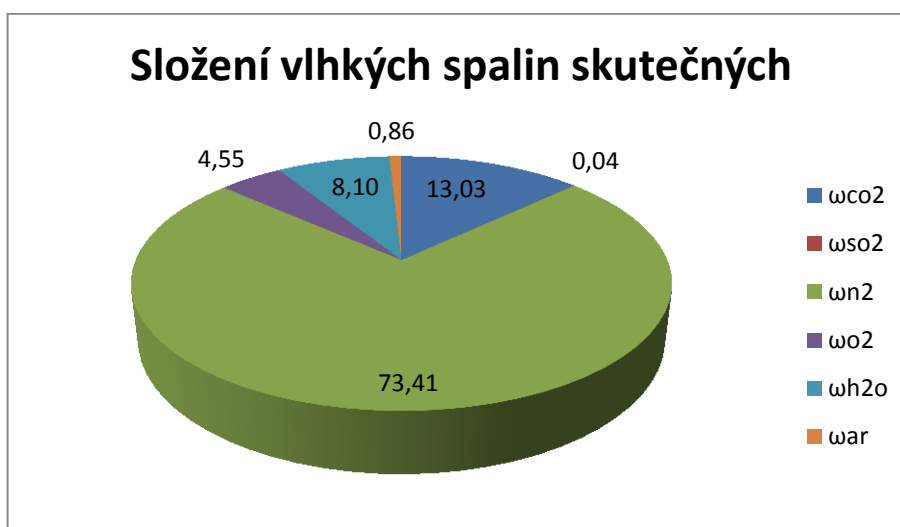
$$\underline{\omega_{AR} = 0,86 [\%]} \quad (3.46)$$

Kontrola:

$$\sum \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{O_2} + \omega_{H_2O} + \omega_{AR}$$

$$\sum 13,04 + 0,04 + 73,41 + 4,55 + 8,10 + 0,86 = 99,99$$

$$\Sigma = 100,00 [\%] \quad (3.47)$$



Obr. 3-6 Složení vlhkých spalin skutečných

d) Složení suchých spalin skutečných ($\alpha = 1,3$):

Množství oxidu uhličitého v suchých spalinách:

$$\omega_{CO_2,sk} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS,sk}} = \frac{1,096}{7,73} \cdot 100 = 14,18$$

$$\underline{\omega_{CO_2,sk} = 14,18 [\%]} \quad (3.48)$$

Množství oxidu siřičitého v suchých spalinách:

$$\omega_{SO_2,sk} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SS,sk}} = \frac{0,003}{7,73} \cdot 100 = 0,04$$

$$\underline{\omega_{SO_2,sk} = 0,04 [\%]} \quad (3.49)$$

Množství dusíku v suchých spalinách:

$$\omega_{N_2,sk} = \frac{O_{N_2}}{O_{SS,sk}} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS,sk} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 1,10 + 0,7805 \cdot 7,90$$

$$\underline{\omega_{N_2,sk} = 79,88 [\%]} \quad (3.50)$$

Množství kyslíku v suchých spalinách:

$$\omega_{O_2,sk} = \frac{O_{O_2}}{O_{SS,sk}} = \frac{(\alpha - 1) \cdot 0,21 \cdot O_{VS,min}}{O_{SS,sk}} = \frac{(1,3 - 1) \cdot 0,21 \cdot 6,08}{7,73} = 4,95$$

$$\underline{\omega_{O_2,sk} = 4,95 [\%]} \quad (3.51)$$

Množství argonu a dalších vzácných plynů ze vzduchu v suchých spalinách:

$$\omega_{AR,sk} = \frac{O_{AR}}{O_{SS,sk}} \cdot 100 = \frac{0,0092 \cdot O_{VS,sk}}{O_{SS,sk}} \cdot 100 = \frac{0,0092 \cdot 7,90}{7,73} \cdot 100 = 0,94$$

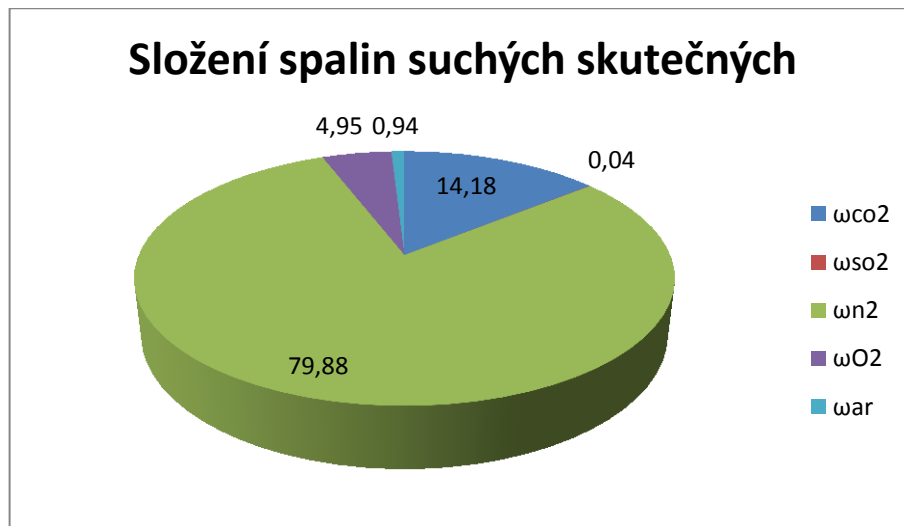
$$\underline{\omega_{AR} = 0,94 [\%]} \quad (3.52)$$

Kontrola:

$$\sum \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{O_2} + \omega_{AR}$$

$$\sum 14,19 + 0,04 + 79,88 + 4,95 + 0,94 = 99,99$$

$$\Sigma = 100,00 [\%] \quad (3.53)$$

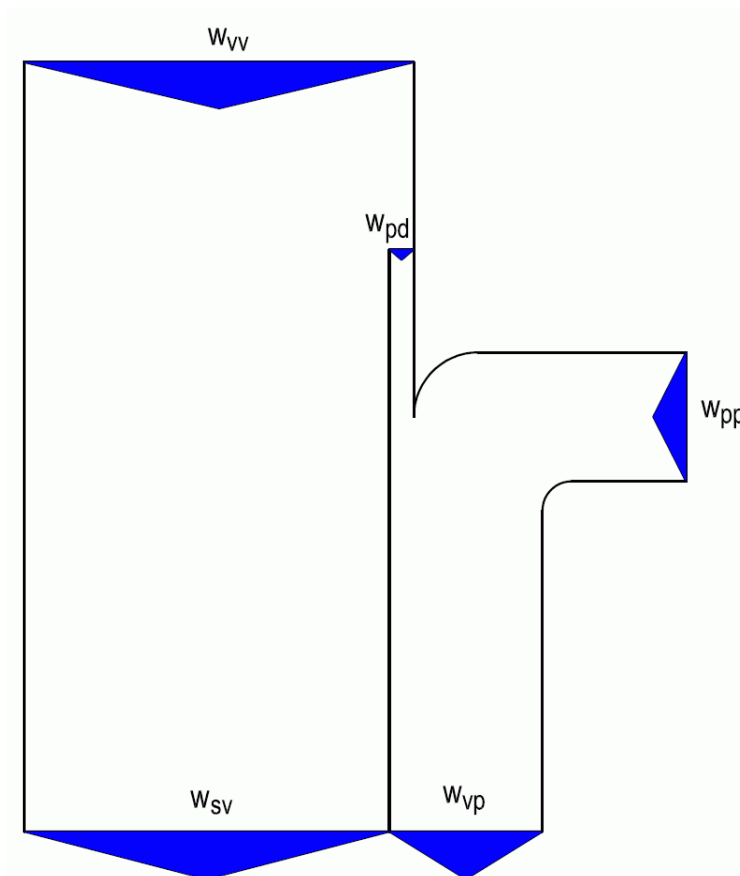


Obr. 3-7 Složení suchých spalin skutečných

4. Vlastnosti parovzduchové směsi:

4.1 Definice parovzduchové směsi:

Parovzduchová směs (pvs) je směs reálného vlhkého vzduchu stlačeného kompresorem a procesní páry. Procesní páru lze rozdělit na páru, která vznikla v důsledku nepřímého chlazení (chlazená spalovací komora kotle) nebo páru, která vznikla v důsledku přímého chlazení (vstřík vody do vzduchu). Pro další výpočty je nutné zjistit množství procesní páry w_{pp} . Ta určuje koncentraci procesní páry v pvs, ale další termodynamické a transportní vlastnosti pvs budou počítány se skutečnou koncentrací vodní páry w_{vp} . Pojem vodní pára tedy znamená množství procesní páry a vlhkosti, která je obsažena ve vzduchu. Vodní pára může být v pvs v přehřátém stavu, nebo v nasyceném stavu v případě dosažení rosného bodu (závisí na parciálním tlaku). V nasyceném stavu odpovídá množství vodní páry v pvs právě parciálnímu tlaku vodní páry.



Obr. 4-1 Definice parovzduchové směsi

4.2 Hmotnostní koncentrace a parciální tlaky:

Pro výpočet termodynamických a transportních vlastností pvs je nutné znát hmotnostní koncentrace w_i směsi a parciální tlaky složek p_i směsi. V kapitole 4.3 počítám i s molárními koncentracemi y_i .

4.2.1 Hmotností koncentrace složek směsi:

Parovzduchovou směs tvoří procesní pára a reálný vlhký vzduch. Pro následující výpočty je ale zásadní znát koncentraci vodní páry w_{vp} a koncentraci suchého vzduchu w_{sv} viz. obrázek 4-1. Reálný vlhký vzduch je určen teplotou, barometrickým tlakem a relativní vlhkostí. Níže je proveden výpočet vlastností pvs pro: teplotu $t_{pvs} = 500^\circ\text{C}$, tlak $p_{pvs} = 12$ bar, koncentraci procesní páry v pvs $w_{pvs} = 0,2$ [-].

Měrná vlhkost vzduchu:

$$d = \frac{r_{sv}}{r_{vp}} \cdot \frac{p_{p,vl}}{p_{p,s}} = \frac{287,1}{461,5} \cdot \frac{0,6 \cdot 0,01706}{0,98 - 0,6 \cdot 0,01706} = 0,006565$$

$$\underline{\mathbf{d = 0,006565 \text{ [kg/kg]}}} \quad (4.1)$$

dměrná vlhkost vzduchu [kg/kg]

r_{sv}měrná plynová konstanta suchého vzduchu [kJ/kgK]

r_{vp}měrná plynová konstanta vodní páry [kJ/kgK]

p_{p,vl}parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu [bar]

p_{p,s}parciální tlak suchého vzduchu ve vlhkém vzduchu [bar]

Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu:

$$w_{pd} = \frac{d}{1 + d} = \frac{0,006565}{1 + 0,006565} = 0,006523$$

$$\underline{\mathbf{w_{pd} = 0,006523 \text{ [kg/kg]}}} \quad (4.2)$$

w_{pd}koncentrace páry ve vlhkém vzduchu [kg/kg]

Koncentrace vodní páry *w_{vp}* v parovzduchové směsi:

$$w_{vp} = (1 - w_{pp}) \cdot w_{pd} + w_{pp} = (1 - 0,2) \cdot 0,00652 + 0,2 = 0,2052$$

$$\underline{\mathbf{w_{vp} = 0,2052 \text{ [kg/kg]}}} \quad (4.3)$$

w_{vp}koncentrace vodní páry v pvs [kg/kg]

w_{pp}koncentrace procesní páry v pvs [kg/kg]

Koncentrace suchého vzduchu v pvs:

$$w_{sv} = 1 - w_{vp} = 1 - 0,2052 = 0,7948$$

$$\underline{\mathbf{w_{sv} = 0,7948 \text{ [kg/kg]}}} \quad (4.4)$$

w_{sv}koncentrace suchého vzduchu v pvs [kg/kg]

4.2.2 Parciální tlaky složek směsi:

Pro termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi je potřeba znát parciální tlaky složek směsi. Parciální tlak vodní páry rovněž určuje rosný bod směsi. Parciální tlak směsi vypočítám jako součet parciálních tlaků suchého vzduchu a vodní páry viz rovnice 4.5.

Parciální tlak vodní páry:

$$p_{vp} = p_c \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right]$$

$$p_{vp} = 12 \cdot \left[1 - \frac{0,7948 \cdot 287,1}{0,7948 \cdot 287,1 + 0,2052 \cdot 461,5} \right] = 3,52$$

$$\underline{p_{vp} = 3,52 \text{ [bar]}} \quad (4.5)$$

p_{vp}parciální tlak vodní páry v pvs [bar]

p_ccelkový tlak směsi [bar]

Parciální tlak suchého vzduchu:

$$p_{sv} = p_c - p_{vp} = 12 - 3,52 = 8,48$$

$$\underline{p_{sv} = 8,48 \text{ [bar]}} \quad (4.6)$$

p_{sv}parciální tlak suchého vzduchu [bar]

4.3 Termodynamické vlastnosti parovzduchové směsi:

Termodynamické vlastnosti parovzduchové směsi je možné určovat z termodynamických vlastností standartního suchého vzduchu, jehož termodynamické vlastnosti jsou tabelovány, stejně jako jsou tabelovány termodynamické vlastnosti vodní páry.

4.3.1 Entalpie pvs směsi:

Entalpie suchého vzduchu:

$$i_{sv} = c_{sv}/_0^{t_{sm}} \cdot t_{sm} = 1,0575 \cdot 500 = 528,75$$

$$\underline{i_{sv} = 528,75 \text{ [kJ/kg]}} \quad (4.7)$$

i_{sv}entalpie suchého vzduchu [kJ/kg]

c_{sv}střední měrná tepelná kapacita [kJ/kgK]

t_{sm}teplota směsi [°C]

Entalpie pvs směsi:

$$i_{sm} = w_{sv} \cdot i_{sv} + w_{vp} \cdot i_{vp} = 0,7948 \cdot 528,75 + 0,2052 \cdot 3486 = 1135,63$$

$$\underline{i_{sm} = 1135,63 \text{ [kJ/kg]}} \quad (4.8)$$

i_{vp}entalpie vodní páry [kJ/kg] viz. EES (teplota 500°C, tlak 3,52 bar)

4.3.2 Hustota parovzduchové směsi:

a) Hustota pvs směsi:

$$\rho_{sm} = \frac{p_{sv}}{r_{sv} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} = \frac{8,4802}{287,1 \cdot 773,15} + \frac{3,5198}{461,5 \cdot 773,15} = 4,807$$

$$\underline{\rho_{sm} = 4,807 \text{ [kg/m}^3\text{]}} \quad (4.9)$$

ρ_{sm}hustota pvs směsi [kg/m³]

b) Hustota parovzduchové směsi přepočtené na normální podmínky:

$$\rho_{sm,N} = \rho_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_{sm}} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} = 4,8069 \cdot \frac{1,01325}{12} \cdot \frac{773,15}{273,15} = 1,149$$

$$\underline{\rho_{sm,N} = 1,149 \text{ [kg/m}^3\text{]}} \quad (4.10)$$

4.3.3 Tepelná vodivost parovzduchové směsi:

$$\lambda_{sm} = \frac{y_{sv} \cdot \lambda_{sv} \cdot M_{sv}^{\frac{1}{3}} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp} \cdot M_{vp}^{\frac{1}{3}}}{y_{sv} \cdot M_{sv}^{\frac{1}{3}} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{\frac{1}{3}}}$$

$$\lambda_{sm} = \frac{0,7067 \cdot 0,05588 \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 0,06715 \cdot 18,02^{1/3}}{0,7067 \cdot 28,96^{1/3} + 0,2933 \cdot 18,02^{1/3}}$$

$$\underline{\lambda_{sm} = 0,05828 \text{ [W/mK]}} \quad (4.11)$$

λ_{sm}tepelná vodivost parovzduchové směsi [W/mK]

λ_{sv}tepelná vodivost suchého vzduchu [W/mK]

λ_{vp}tepelná vodivost vodní páry [W/mK]

M_{sv}molární hmotnost suchého vzduchu [kg/kmol]

M_{vp}molární hmotnost vodní páry [kg/kmol]

y_{sv}molární podíl suchého vzduchu [kmol/kmol]

y_{vp}molární podíl vodní páry [kmol/kmol]

4.3.4 Viskozita parovzduchové směsi

a) Dynamická viskozita pvs:

$$\eta_{sm} = \frac{\eta_{vp}}{1 + \Phi_{pv} \cdot \frac{y_{sv}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{sv}}{1 + \Phi_{vp} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{sv}}} = \frac{28,58 \cdot 10^{-6}}{1 + 1,105 \cdot \frac{0,7067}{0,2933}} + \frac{36,58 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,880 \cdot \frac{0,2933}{0,7067}}$$

$$\underline{\eta_{sm} = 34,597 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa/s]}} \quad (4.12)$$

η_{sm} dynamická viskozita parovzduchové směsi [Pa/s]

η_{vp} dynamická viskozita vodní páry [Pa/s] (EES, teplota 500°C, tlak 8,48 bar)

η_{sv} dynamická viskozita suchého vzduchu [Pa/s] (EES, teplota 500°C, tlak 3,52 bar)

Φ_{vp} korelace

Φ_{sv} korelace

Korelace:

$$\Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{vp}}{\eta_{sv}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{sv}}{M_{vp}}\right)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{vp}}{M_{sv}}\right)^{1/2}} = \Phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{28,58}{36,58}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,96}{18,02}\right)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{18,02}{28,96}\right)^{1/2}}$$

$$\underline{\Phi_{pv} = 1,105 [-]} \quad (4.13)$$

$$\Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{sv}}{\eta_{vp}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{vp}}{M_{sv}}\right)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{sv}}{M_{vp}}\right)^{1/2}} = \Phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{36,58}{28,58}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{18,02}{28,96}\right)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{28,96}{18,02}\right)^{1/2}}$$

$$\underline{\Phi_{vp} = 0,880 [-]} \quad (4.14)$$

b) Kinematická viskozita pvs:

$$v_{sm} = \frac{\eta_{sm}}{\rho_{sm}} = \frac{34,597 \cdot 10^{-6}}{4,8069} = 7,197 \cdot 10^{-6}$$

$$\underline{v_{sm} = 7,197 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}} \quad (4.15)$$

v_{sm} kinematická viskozita pvs [m²/s]

Tento výpočet je pouze informativní. V programu EES jsem vytvořil program, který tyto hodnoty přepočítává při změně vstupních parametrů (teplota, tlak, koncentrace) parovzduchové směsi.

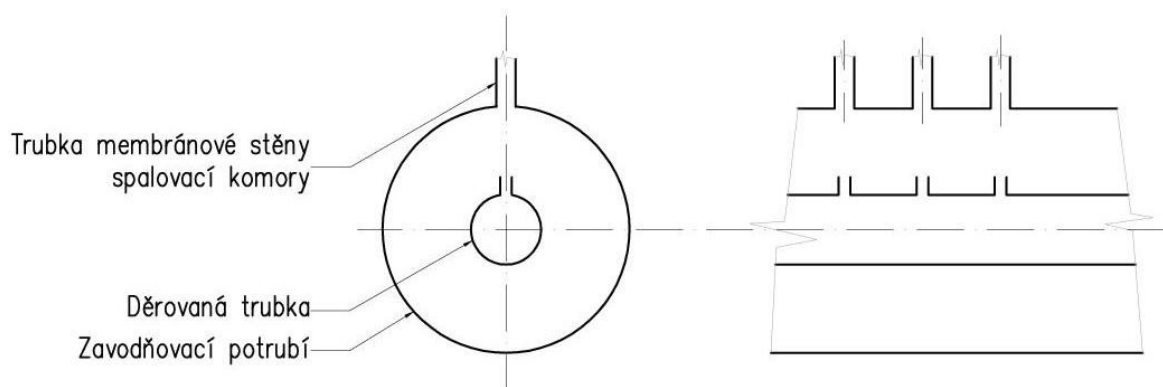
5. Schéma voda – pára.

V této kapitole popisují průtok pracovního média, konkrétně vody respektive páry kotlem, expanzi na turbíně a následné smíchání páry se stlačeným vzduchem, přičemž vzniká parovzduchová směs.

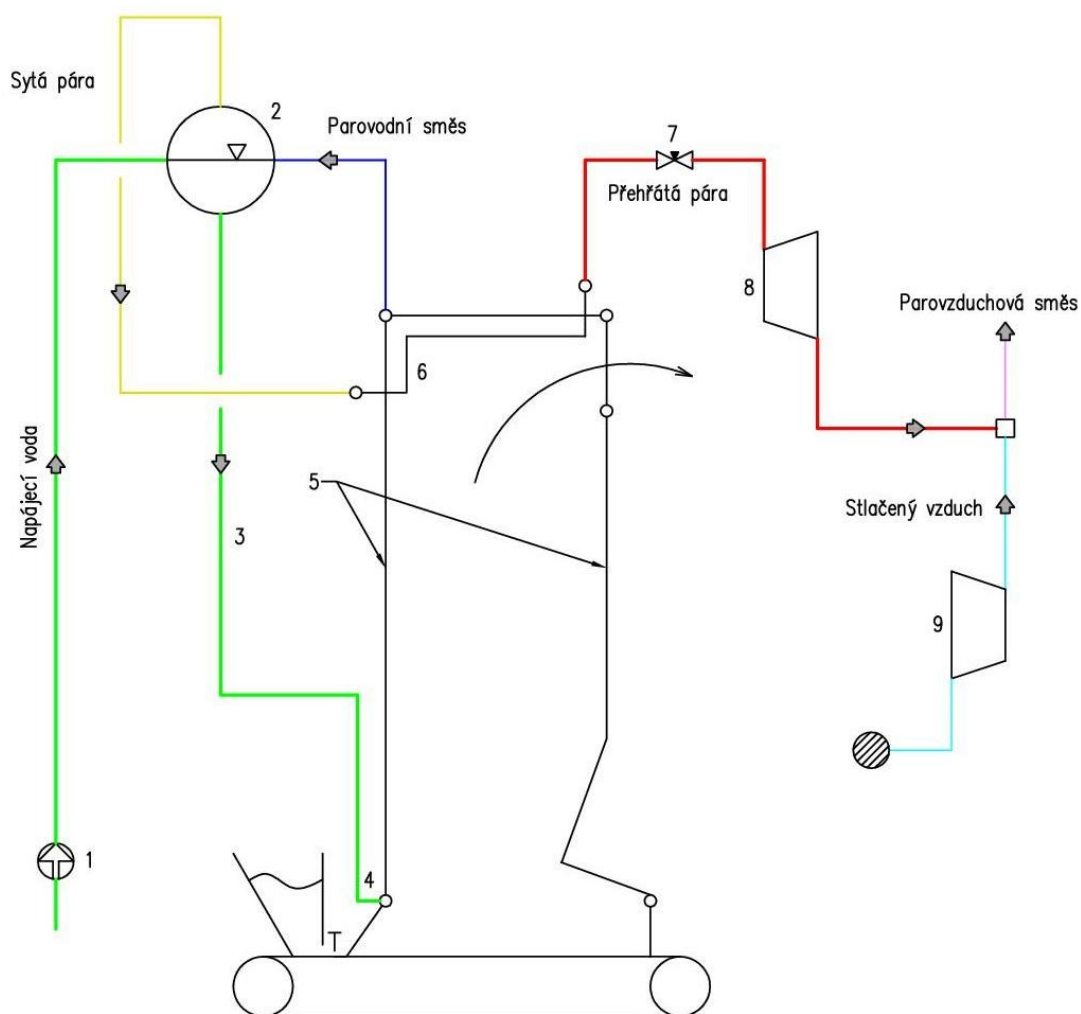
Napájecí voda o teplotě 105 °C se přivádí napájecím čerpadlem (1) do bubnu kotle (2). Z kotlového bubnu se vede spádovými (3) a převáděcími trubkami (4) do membránové stěny kotle (5). Zde dochází k odpařování vody a parovodní směs je vedena do bubnu a z jeho parní části se sytá pára vede do deskového přehříváku páry (6). Pára se po průchodu přehřívákem vede přes regulační armaturu (7) na turbínu (8) kde dochází k expanzi. Vyexpandovaná pára se následně smísí se vzduchem stlačeného kompresorem (9) a vzniká parovzduchová směs, která je definovaná teplotou, tlakem a koncentrací procesní páry. Pro lepší představivost je přiložen obrázek 5-2.

Detailnější je výkres VAL0093 – V.01 přiložený v příloze, kde je vidět, že se napájecí voda dopravuje přes systém regulačních armatur do bubnu kotle, který je opatřen regulačními, pojistnými armaturami a vodoznakem. Odtud se voda dopravuje čtyřmi spádovými trubkami do jednotlivých stěn ohniště, před kterými je proveden ještě systém odvodnění. Jak již bylo zmíněno, parovodní směs o suchosti 95% je vedena do bubnu a následně do deskového přehříváku páry (40 bar, 270°C, 95%). Poté expanduje na turbíně, kde hodnoty před expanzí jsou stejné jako parametry po přehřátí v deskovém přehříváku a parametry po expanzi jsou (11,1 bar, 270°C, 95%).

Pro najíždění kotle se používá tzv. barbotáž (obr. 5-1), což je v podstatě předeřev kotelní vody cizí parou, provádí se to tak, že v zavodňovací komoře každé stěny je umístěna trubka, která má nahoře provedeny otvory v ose každé trubky stěny. Dochází tedy k probublávání páry do vody. To se provádí do té doby, než voda získá potřebnou teplotu (cca 100 °C), poté dochází k odstavení páry z cizího zdroje a kotel začíná pracovat v normálním najížděcím režimu. Tato technologie je ekonomicky výhodnější, protože vede k úspoře zemního plynu při najíždění.



Obr. 5-1 Barbotáž



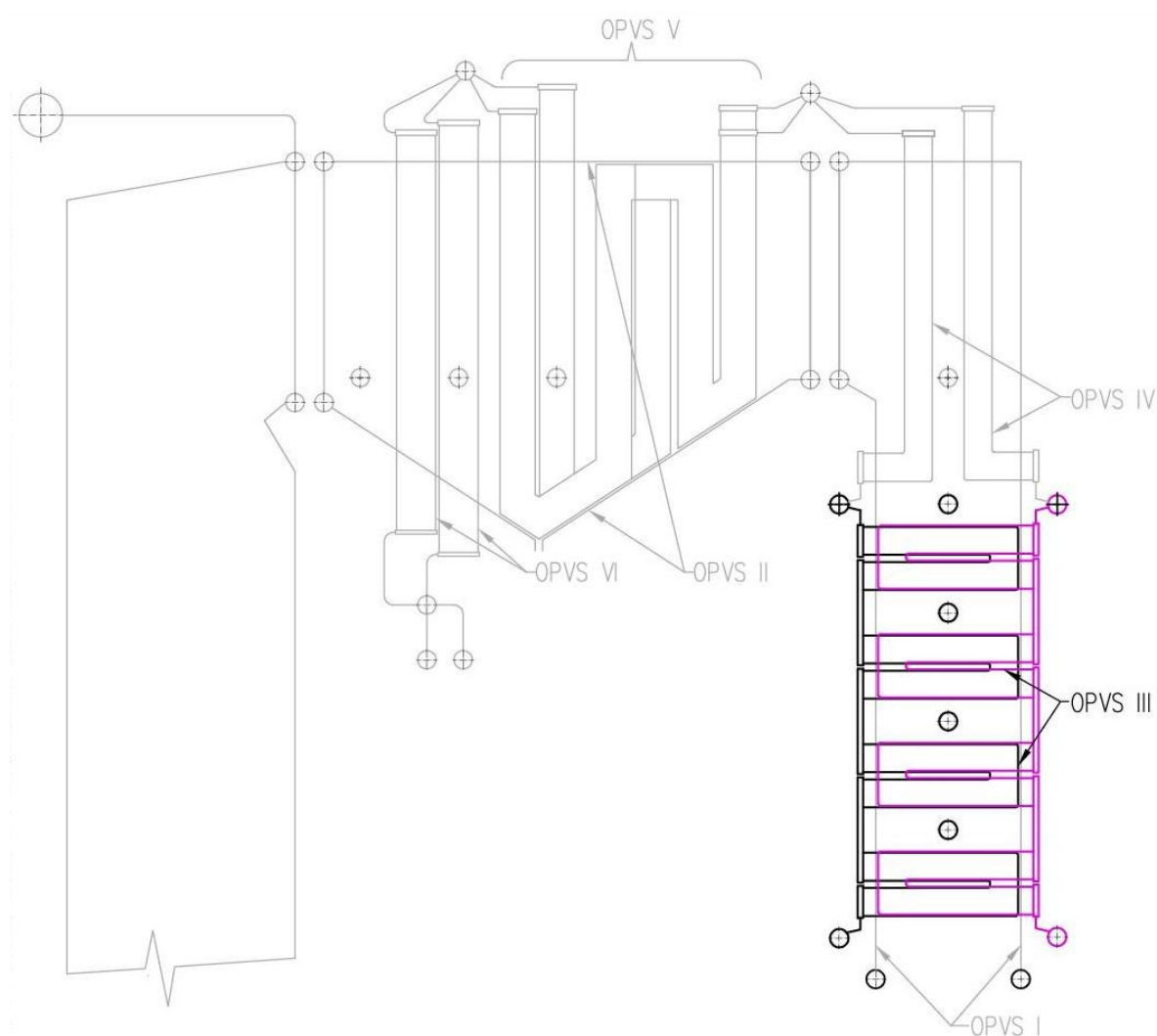
Obr. 5-2 Schéma voda - pára

6. Tepelný výpočet OPVS.

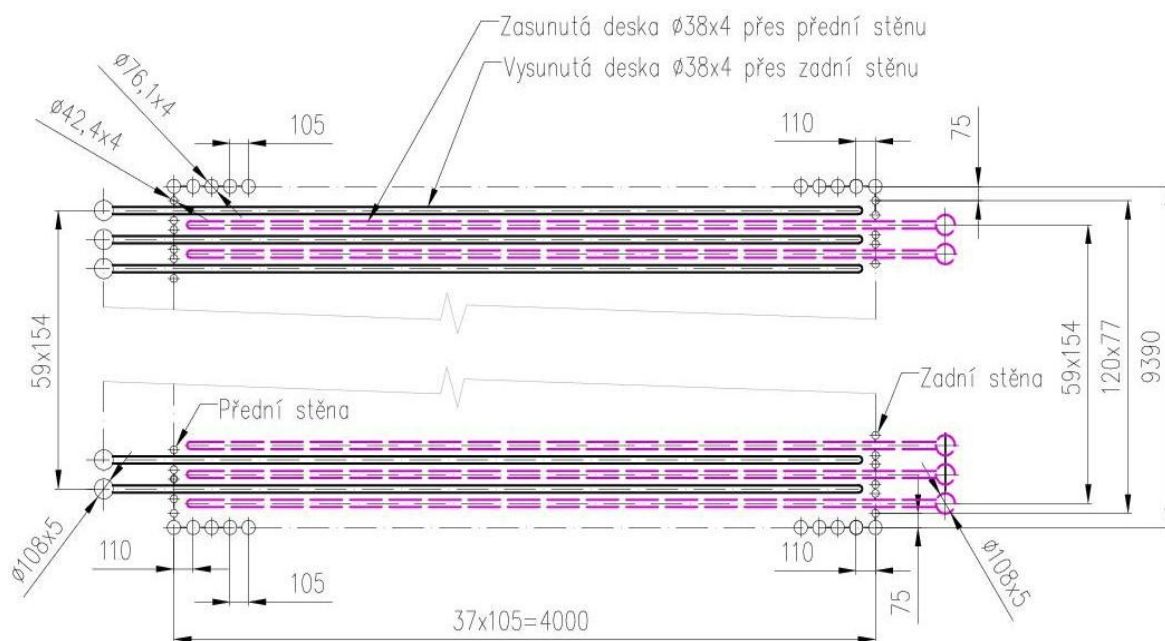
Na obrázku 6-1 je znázorněna celková koncepce ohřívačku parovzduchové směsi tak jak ji má navrženou firma VPE. Koncepce části OPVS III je provedena jako vodorovná plocha a obdobně by byla řešena i část OPVS IV, zatímco části OPVS V a OPVS VI by byly svislé. Plocha OPVS I a OPVS II je součástí vodorovného, respektive svislého tahu kotle. V rámci zadání diplomové práce počítám a navrhuji pouze vstupní plochu OPVS III.

6.1 Stanovení počtu trubek vstupní části OPVS III.

Jak jsem již zmínil výše, návrh vstupního OPVS III je proveden jako vodorovný. Je tvořen deskami z membránových stěn, které se vkládají výhybkami mezi trubkami membránových stěn OPVS I. Princip vkládání desek z membránových stěn je naznačen na obrázku 6-2. Výhody a nevýhody ohřívačku parovzduchové směsi z desek tvořených membránovou stěnou je uveden v závěru diplomové práce.



Obr. 6-1 Koncepce ohřívačku parovzduchové směsi dle VPE



Obr. 6-2 Princip konstrukce vstupní části OPVS III

Výpočtové množství přivedeného paliva:

$$m_{pal} = \frac{Q}{Q_i^r} = \frac{120}{23} = 5,22$$

$$\underline{m_{pal} = 5,22 \text{ [kg/s]}} \quad (6.1)$$

m_{pal}množství přivedeného paliva [kg/s]

Qvýkon [MW]

Q_i^rvýhřevnost paliva [MJ/kg]

Skutečná spotřeba paliva:

$$m_{pv} = m_{pal} \cdot (1 - Z_{MN}) = 5,22 \cdot (1 - 0,03) = 5,06$$

$$\underline{m_{pv} = 5,06 \text{ [kg/s]}} \quad (6.2)$$

m_{pv}skutečná spotřeba paliva [kg/s]

Z_{MN}ztráta mechanickým nedopalem [%] (v tomto případě $Z_{MN} = 3\%$)

Množství spalin:

$$V_{SP} = O_{SV,sk} \cdot m_{pv} = 8,41 \cdot 5,06 = 42,56$$

$$\underline{V_{SP} = 42,56 \text{ [m}_N^3\text{/s]}} \quad (6.3)$$

V_{SP}Množství spalin [m_N^3/s]

$O_{SV,sk}$Množství skutečných vlhkých spalin (viz. kap. 3.2 Stechiometrie)

Skutečný průtok spalin:

V tomto výpočtu počítám s teplotou spalin na vstupu do OVPS III, protože tato hodnota více vypovídá o problematice abraze.

$$V_{sp,sk} = V_{sp} \cdot \frac{T_{sp,1}}{T_N} = 42,56 \cdot \frac{(273,15 + 645,6)}{273,15} = 143,16$$

$$\underline{V_{SP,sk} = 143,16 [m^3/s]} \quad (6.4)$$

$V_{sp,sk}$Množství spalin za normálních podmínek [m^3/s]

$T_{sp,1}$Vstupní teplota spalin [$^{\circ}C$]

T_NTeplota za normálních podmínek [K]

Průtočný průřez spalin pro 1 m (viz. Obr. 6-2):

$$S_{sp1m} = a \cdot 1 - n_{dv} \cdot D \cdot 1 = 9,390 \cdot 1 - 60 \cdot 0,038 \cdot 1 = 7,11$$

$$\underline{S_{sp1m} = 7,11 [m^2]} \quad (6.5)$$

S_{sp1m}průtočný průřez spalin pro 1 metr [m^2]

a delší strana kanálu [m]

n_{dv}počet vysunutých desek [-]

Dvnější průměr trubky OPVS [m]

Průtočný průřez spalin pro 4 m (viz Obr. 6-2):

$$S_{sp4m} = S_{sp1m} \cdot b = 7,11 \cdot 4 = 28,44$$

$$\underline{S_{sp4m} = 28,44 [m^2]} \quad (6.6)$$

b kratší strana kanálu (zvoleno)

Vstupní rychlosti spalin w_{sp} :

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,sk}}{S_{SP4m}} = \frac{143,16}{28,44} = 5,03$$

$$\underline{w_{sp} = 5,03 [m/s]} \quad (6.7)$$

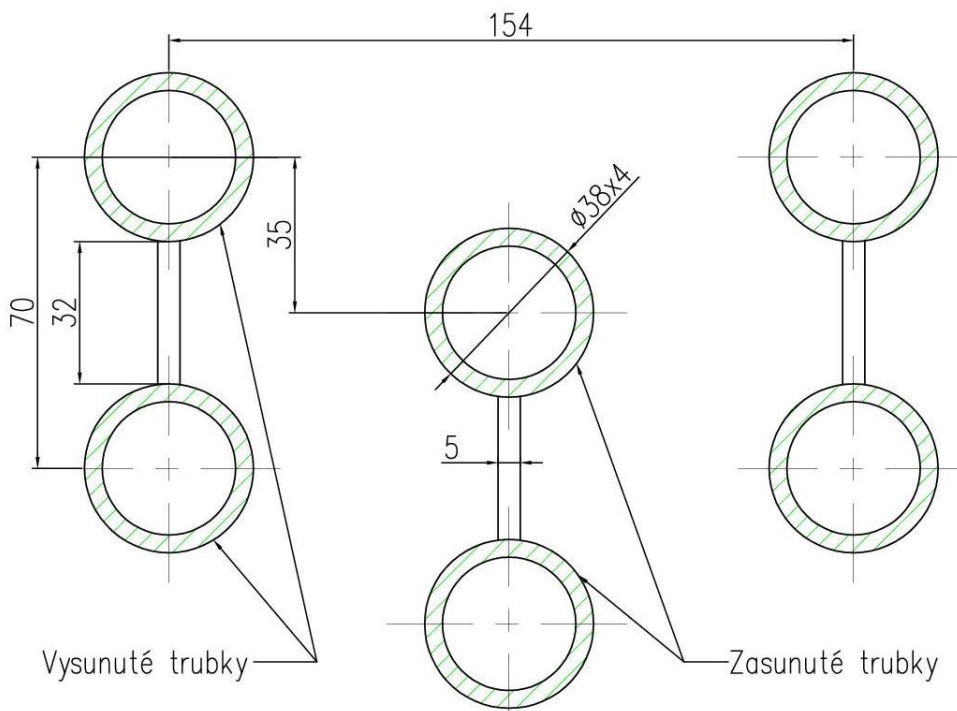
Vstupní rychlost spalin z hlediska abraze vyhovuje.

Počet desek na kotel n_d :

$$n_d = n_{d,v} + n_{d,z} = 60 + 60 = 120$$

$n_d = 120 [-]$ (6.8)

$n_{d,z}$ počet zasunutých desek



Obr. 6-3 Uspořádání desek OPVS III

Vstupní parametry parovzduchové směsi:

Teplota $t_{pvs} = 350 \text{ °C}$; tlak $p_{pvs} = 11,08 \text{ bar}$; koncentrace procesní páry $w = 0,43 \text{ %}$.

Pro tyto vstupní parametry je průtok parovzduchové směsi $q_{pvs} = 68 \text{ kg/s}$ (vypočteno v programu Thermoflex) a hustota parovzduchové směsi $\rho_{pvs} = 4,493 \text{ kg/m}^3$ (určeno v programu EES).

Měrný objem parovzduchové směsi v_{pvs} :

$$v_{pvs} = \frac{1}{\rho_{pvs}} = \frac{1}{4,493} = 0,22$$

$v_{pvs} = 0,22 \text{ [m}^3/\text{kg]}$ (6.9)

Objemový průtok parovzduchové směsi:

$$V_{pvs} = \dot{m}_{pvs} \cdot v_{pvs} = 68 \cdot 0,22 = 15,13$$

$$\underline{V_{pvs} = 15,13 \text{ [m}^3/\text{s]}} \quad (6.10)$$

V_{pvs} objemový průtok parovzduchové směsi [m³/s]

Výpočet průtočné plochy trubky OPVS:

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (38 - 2 \cdot 4)^2}{4} = 0,000707$$

$$\underline{S_{tr} = 0,000707 \text{ [m}^2\text{]}} \quad (6.11)$$

S_{tr} Průtočná plocha trubky OPVS [m²]

d vnitřní průměr trubky OPVS [m]

Pro výpočet plochy OPVS je rychlost parovzduchové směsi 15 m/s.

Průtočný průřez ohříváku parovzduchové směsi S:

$$S = \frac{V_{pvs}}{w_{pvs}} = \frac{15,13}{15} = 1,01$$

$$\underline{S = 1,01 \text{ [m}^2\text{]}} \quad (6.12)$$

w_{pvs} rychlost pvs směsi [m/s]

Celkový počet trubek n_c :

$$n_c = \frac{S}{S_{tr}} = \frac{1,01}{0,000707} = 1428,13$$

$$\underline{n_c = 1428 \text{ [-]}} \quad (6.13)$$

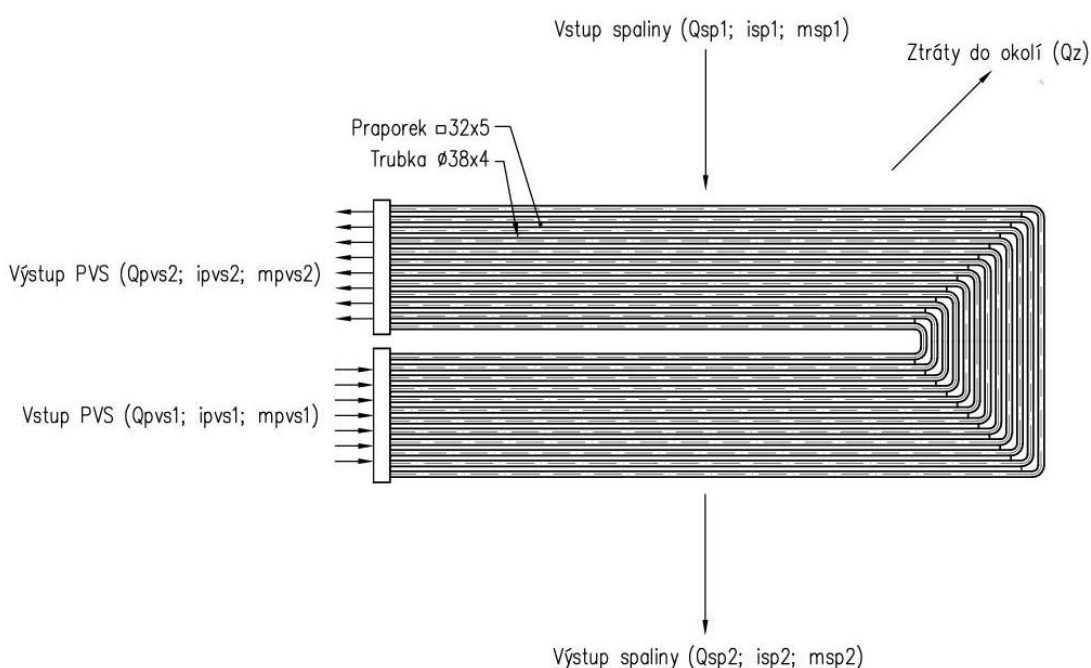
Počet trubek v desce:

$$n_{td} = \frac{n_c}{n_d} = \frac{1428}{120} = 11,9$$

$$\underline{n_{td} = 12 \text{ [-]}} \quad (6.14)$$

6.2 Výpočet velikosti vstupní teplosměnné plochy OPVS III.

Pro výpočet teplosměnné plochy ohříváku parovzduchové směsi OPVS III je potřeba vypočítat součinitel přestupu tepla na straně parovzduchové směsi α_{pvs} . K tomu je nutné znát vlastnosti PVS. Pro tyto vlastnosti jsem vytvořil matematický model, který v závislosti na teplotě, tlaku a koncentraci procesní páry v pvs vypočte potřebné termomechanické vlastnosti parovzduchové směsi. Dále jsem vypočetl součinitel přestupu tepla na straně spalin jak konvekcí $\alpha_{sp,k}$, tak sáláním α_{sal} . Následně jsem určil součinitel prostupu tepla k , střední teplotní logaritmičkový spád Δt , bilanční výkon teplosměnné plochy Q_{pvs} a nakonec jsem vypočítal plochu ohříváku OPVS III.



Obr. 6-4 Deska OPVS III

6.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně parovzduchové směsi:

Bilanční rovnice OPVS III:

$$Q_{pvs,1} + Q_{sp,1} = Q_{pvs,2} + Q_{sp,2} + Q_Z \quad (6.15)$$

Abych mohl vyjádřit střední měrnou tepelnou kapacitu parovzduchové směsi a spalin, potřebuji znát rozdíl entalpií pvs a spalin na vstupu a výstupu viz. obr. 6-4.

Rozdíl entalpií pvs na výstupu a na vstupu Δi_{pvs} :

$$\Delta i_{pvs} = i_{pvs,2} - i_{pvs,1} = 559,7 - 421,5 = 138,2$$

$$\underline{\Delta i_{pvs} = 138,2 \text{ [kW]}} \quad (6.16)$$

$i_{pvs,2}$ entalpie pvs na výstupu [kJ/kg] viz. THERMOFLEX

$i_{pvs,1}$ entalpie pvs na vstupu [kJ/kg] viz. THERMOFLEX

Rozdíl entalpií spalin na vstupu a na výstupu Δi_{sp} :

$$\Delta i_{sp} = i_{sp,1} - i_{sp,2} = 689,6 - 532,7 = 156,9$$

$$\underline{\Delta i_{sp} = 156,9 \text{ [kW]}} \quad (6.17)$$

$i_{sp,2}$ entalpie spalin na výstupu [kJ/kg] viz. THERMOFLEX

$i_{sp,1}$ entalpie spalin na vstupu [kJ/kg] viz. THERMOFLEX

Střední měrná tepelná kapacita parovzduchové směsi $cp_{stř,pvs}$:

$$Q_{pvs,1} = cp_{stř,pvs} \cdot (t_{pvs,2} - t_{pvs,1}) \rightarrow cp_{stř,pvs} = \frac{Q_{pvs,1}}{t_{pvs,2} - t_{pvs,1}} = \frac{138,2}{450 - 350}$$

$$\underline{cp_{stř,pvs} = 1,382 \text{ [kJ/kgK]}} \quad (6.18)$$

$t_{pvs,2}$ teplota pvs na výstupu [°] viz. THERMOFLEX

$t_{pvs,1}$ teplota pvs na vstupu [°] viz. THERMOFLEX

Střední měrná tepelná kapacita spalin $cp_{stř,sp}$:

$$Q_{sp,1} = cp_{stř,sp} \cdot (t_{sp,2} - t_{sp,1}) \rightarrow cp_{stř,sp} = \frac{Q_{sp,1}}{t_{sp,2} - t_{sp,1}} = \frac{156,9}{645,6 - 512,8}$$

$$\underline{cp_{stř,sp} = 1,181 \text{ [kJ/kgK]}} \quad (6.19)$$

$t_{sp,2}$ teplota spalin na výstupu [°] viz. THERMOFLEX

$t_{sp,1}$ teplota spalin na vstupu [°] viz. THERMOFLEX

Výpočet Prandtlova kritéria pvs:

$$Pr_{pvs} = \frac{\eta_{pvs} \cdot cp_{stř,pvs}}{\lambda_{pvs}} = \frac{28,79 \cdot 10^{-6} \cdot 1,382 \cdot 10^3}{0,05283} = 0,753$$

$$\underline{Pr_{pvs} = 0,753 \text{ [-]}} \quad (6.20)$$

Pr_{pvs} Prandtlovo kritérium pvs [-]

η_{pvs} dynamická viskozita pvs [Pa/s] viz. EES

λ_{pvs} součinitel tepelné vodivosti pvs [W/mK] viz. EES

Součinitel přestupu tepla na straně parovzduchové směsi:

$$\alpha_{pvs} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{pvs}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{pvs} \cdot d_e}{\nu_{pvs}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{pvs}^{0,4}$$

$$\alpha_{pvs} = 0,023 \cdot \frac{0,05283}{0,03} \cdot \left(\frac{15 \cdot 0,03}{6,41 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,753^{0,4} = 272,47$$

$$\underline{\alpha_{pvs} = 272,47 \text{ [W/m}^2\text{K]}} \quad (6.21)$$

d_e ekvivalentní průměr [m]

ν_{pvs} kinematická viskozita [m²/s]

6.2.2 Přestup tepla na straně spalin:

Poměrná podélná rozteč trubek:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,154}{0,038} = 4,05$$

$$\underline{\sigma_1 = 4,05 [-]} \quad (6.22)$$

σ_1 poměrná příčná rozteč trubek [-]

s_1 příčná rozteč [m] viz. obr. 6-3

Poměrná příčná rozteč trubek:

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,035}{0,038} = 0,92$$

$$\underline{\sigma_2 = 0,92 [-]} \quad (6.23)$$

σ_2 poměrná podélná rozteč trubek [-]

s_2 podélná rozteč [m] viz. obr. 6-3

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek σ_2' :

$$\sigma_2' = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 4,05^2 + 0,92^2} = 2,23$$

$$\underline{\sigma_2' = 2,23 [-]} \quad (6.24)$$

Výpočet parametru φ_d :

$$\varphi_d = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{4,05 - 1}{2,23 - 1} = 2,49$$

$$\underline{\varphi_d = 2,49 [-]} \quad (6.25)$$

Podle literatury [3] platí, že korekční součinitel C_s na uspořádání svazku se určí:

$$\text{pro } 1,7 < \varphi_d \leq 4,5 \text{ při } \sigma_1 \geq 3 \rightarrow C_s = 0,34 \cdot \varphi_d^{0,1} = 0,34 \cdot 2,49^{0,1} = 0,372$$

$$\underline{C_s = 0,372 [-]}$$

Korekční součinitel C_z na počet řad svazku v podélném směru proudu se určí z podmínky:

$$z_2 \geq 10 \rightarrow C_z = 1$$

$$\underline{C_z = 1 [-]}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin:

$$\alpha_{sp,k} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v_{sp}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{sp}^{0,33}$$

$$\alpha_{sp,k} = 1 \cdot 0,372 \cdot \frac{0,07845}{0,038} \cdot \left(\frac{5,06 \cdot 0,038}{9,82 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,605^{0,33}$$

$$\underline{\alpha_{sp,k} = 61,51 [W/m^2K]} \quad (6.26)$$

λ_{sp}souč. tepelné vodivosti. spalin [W/mK] Skripta str. 49 pro teplotu $t_{SP1} = 645,6 \text{ }^\circ\text{C}$

v_{sp}souč. kin. viskozity spalin [m^2/s] Skripta str. 49 pro teplotu $t_{SP1} = 645,6 \text{ }^\circ\text{C}$

Pr_{sp}prandtlovo číslo spalin [-] Skripta str. 49 pro teplotu $t_{SP1} = 645,6 \text{ }^\circ\text{C}$

6.2.3 Přestup tepla sáláním:

Výpočet součinitele zanesení:

$$\varepsilon = C_D \cdot C_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = 1,02 \cdot 1 \cdot 0,002 + 0,0025 = 0,00454$$

$$\underline{\varepsilon = 0,00454 [m^2K/W]} \quad (6.27)$$

ε součinitel zanesení [m^2K/W]

C_D opravný koef. na průměr trubek [-], určeno z lit. [3] str. 122 pro $\varnothing 38 \text{ mm}$

C_f opravný koeficient na jemnost popílkových částic [-]

ε_0 základní hodnota součinitele zanesení [m^2K/W], určeno z lit [3] str. 122
 v závislosti na rychlosti spalin a podílu podélné rozteče trubek a vnějšího průměru trubek
 $\Delta\varepsilon$ přírážka [-], viz. lit. [3] str. 123

Teplota povrchu nánosů na straně spalin T_z :

$$t_z = t_{pvs, str} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{pvs}} \right) \cdot \frac{Q + Q_{sal}}{S} = 400 + \left(0,00454 + \frac{1}{272,47} \right) \cdot 20000 = 570,32$$

$$\underline{\underline{t_z = 564,20[^\circ C]; T_z = 837,35 [K]}} \quad (6.28)$$

$t_{pvs, str}$ střední teplota pracovního média v trubkách [$^\circ C$]

α_{pvs} součinitel přestupu tepla na straně pvs [W/m^2K]

Q tepelný příkon ze spalin [kW]

Q_{sal} tepelný příkon odevzdaný sáláním z ohniště [kW]

S výhřevná plocha [m^2]

$(Q+Q_{sal})/2$ v tomto výpočtu se pracuje s velikostí plochy S a tepelnými výkony Q a Q_{sal} , které v této fázi výpočtu nejsou známe a je třeba je odhadnout. Podle lit. [3] volím tuto hodnotu pro svazkové přehříváky 20 kW.

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy s :

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \cdot 0,4 = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,154 \cdot 0,035}{0,038^2} - 1 \right) \cdot 0,4$$

$$\underline{\underline{s = 0,51 [m]}} \quad (6.29)$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách r_{H_2O} :

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_s - 1) \cdot O_{VS, min}}{O_{SV, min} + (\alpha_s - 1) \cdot O_{VV, min}} = \frac{0,656 + (1,014 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 6,08}{6,565 + (1,3 - 1) \cdot 6,16}$$

$$\underline{\underline{r_{H_2O} = 0,081 [-]}} \quad (6.30)$$

legenda viz kap. 3.2 Stechiometrické výpočty pro spalování zadaného paliva

Objemová koncentrace CO_2 a SO_2 ve spalinách r_{RO_2} :

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV, min} + (\alpha_s - 1) \cdot O_{VV, min}} = \frac{1,096 + 0,003}{6,565 + (1,3 - 1) \cdot 6,16} = 0,131$$

$$\underline{\underline{r_{RO_2} = 0,131 [-]}} \quad (6.31)$$

legenda viz kap. 3.2 Stechiometrické výpočty pro spalování zadaného paliva

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách r_s :

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,081 + 0,131 = 0,212$$

$$\underline{\mathbf{r_s = 0,212 [-]}} \quad (6.32)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách p_s :

$$p_s = r_s \cdot p = 0,212 \cdot 0,1 = 0,0212$$

$$\underline{\mathbf{p_s = 0,0212 [MPa]}} \quad (6.33)$$

p tlak spalín, běžně se bere $p = 0,1$ MPa, [lit.3]

Výpočet součinitele zeslabení sálání tříatomovými plyny $k_s r_s$:

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{sp, stř}}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,081}{3,16 \cdot \sqrt{0,0212 \cdot 0,51}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{852,35}{1000} \right) \cdot 0,212$$

$$\underline{\mathbf{k_s \cdot r_s = 12,51 [-]}} \quad (6.34)$$

$T_{sp, stř}$ střední teplota spalín [K]

Optická hustota spalín $k_p s$:

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 12,51 \cdot 0,1 \cdot 0,051 = 0,064$$

$$\underline{\mathbf{k \cdot p \cdot s = 0,064 [-]}} \quad (6.35)$$

Stupeň černosti proudu spalín a :

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,064} = 0,062$$

$$\underline{\mathbf{a = 0,062 [-]}} \quad (6.36)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_S}\right)^4}{1 - \frac{T_Z}{T_S}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,062 \cdot 852,35^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{837,35}{852,35}\right)^4}{1 - \frac{837,35}{852,35}}$$

$\alpha_{sal} = 7,70 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (6.37)

a_{st} stupeň povrchu černosti stěn [-], počítá se s hodnotou $a_{st} = 0,8$ (lit.[3])

Výsledný součinitel přestupu tepla na straně spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot \alpha_{sp,k} + \alpha_{sal} = 1 \cdot 61,30 + 7,70 = 69,00$$

$\alpha_{sp} = 69,00 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (6.38)

ω součinitel omývání plochy [-], určeno z lit. [3] str. 94

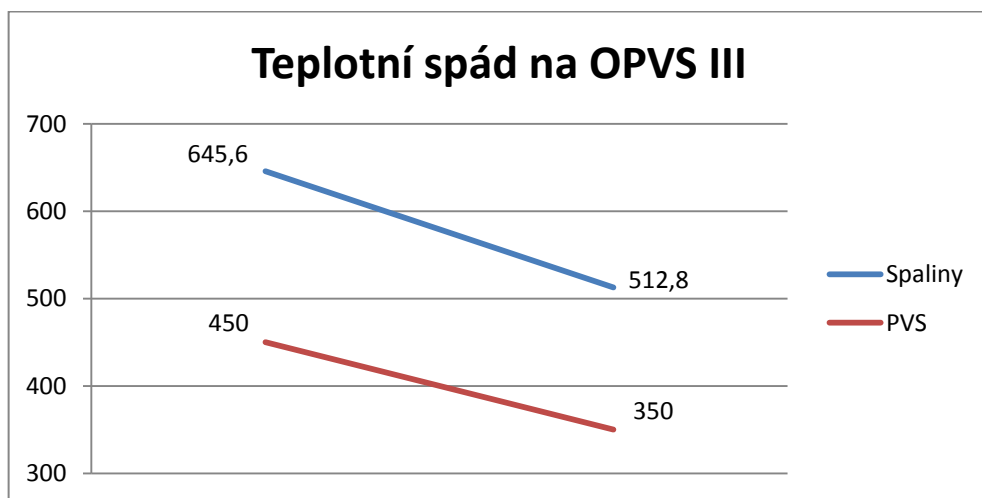
6.2.4 Výpočet velikosti teplosměnné plochy OPVS III:

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_{sp}}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{pvs}}\right) \cdot \alpha_{sp}} = \frac{69,00}{1 + \left(0,00454 + \frac{1}{272,47}\right) \cdot 69,00} = 44,05$$

$k = 44,05 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ (6.39)

Výpočet teplotního spádu:



Obr. 6-5 Rozložení teploty spalin na vstupu a výstupu z OPVS III

$$\Delta t_1 = t_{sp,1} - t_{pvs,2} = 645,6 - 450 = 195,6$$

$$\underline{\Delta t_1 = 195,6 \text{ [}^\circ\text{C]}} \quad (6.40)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp,2} - t_{pvs,1} = 512,8 - 350 = 162,8$$

$$\underline{\Delta t_2 = 162,8 \text{ [}^\circ\text{C]}} \quad (6.41)$$

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = 0,98 \cdot \frac{195,6 - 162,8}{\ln \frac{195,6}{162,8}} = 175,12$$

$$\underline{\Delta t = 175,12 \text{ [}^\circ\text{C]}} \quad (6.42)$$

Δt_1 vyšší rozdíl teplot [°C]

Δt_2 nižší rozdíl teplot [°C]

Δt teplotní spád [°C]

ψ součinitel přechodu od protiproudého zapojení ke kombinovanému [-]. Určeno z nomogramu lit [3] str. 129

Bilanční výkon OPVS III viz. obr. 6.6:

$$Q_{pvs} = m_{pvs,1} \cdot (i_{pvs,1} - i_{pvs,2}) = 68 \cdot (559,7 - 421,5) = 9397,6$$

$$\underline{Q_{pvs} = 9397,6 \text{ [kW]}} \quad (6.43)$$

$m_{pvs,1}$ množství parovzduchové směsi [kg/s]

Q_{pvs} tepelný výkon předaný parovzduchovou směsí [kW]

$$Q_{sp} = m_{sp,1} \cdot (i_{sp,1} - i_{sp,2}) = 60,44 \cdot (689,6 - 532,7) = 9483,04$$

$$\underline{Q_{sp} = 9483,04 \text{ [kW]}} \quad (6.44)$$

$m_{sp,1}$ množství spalin [kg/s]

Q_{sp} tepelný výkon předaný spalinami [kW]

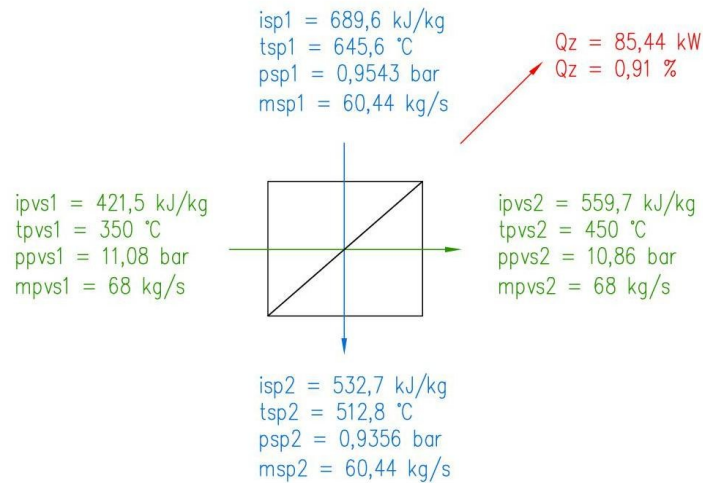
Ztráta tepla do okolí Q_z :

$$Q_z = Q_{sp} - Q_{pvs} = 9483,04 - 9397,6 = 85,44$$

$$\underline{Q_z = 85,44 \text{ [kW]}} \quad (6.45)$$

$$\frac{9397,6 \dots 100\%}{85,44 \dots x\%} \rightarrow x = \frac{85,44}{93,976} = 0,91$$

$$\underline{x = 0,91 [\%]} \quad (6.46)$$



Obr. 6-6 Bilanční výkon OPVS III

Velikost výhřevné plochy OPVS III:

$$S_{OPVSIII} = \frac{Q_{PVS}}{k \cdot \Delta t} = \frac{9397,6 \cdot 10^3}{44,05 \cdot 175,12} = 1218,29$$

$$\underline{S_{OPVSIII} = 1218,29 [\text{m}^2]} \quad (6.47)$$

Q_{PVS} bilanční výkon OPVS III [kW]

k součinitel prostupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Velikost plochy 1 metru trubky:

$$S_{1m}^{1428} = n_c \cdot D \cdot \pi \cdot 1 = 1428 \cdot 0,038 \cdot 3,14 \cdot 1 = 151,21$$

$$\underline{S_{1m}^{1428} = 151,21 [\text{m}^2]} \quad (6.48)$$

n_c celkový počet trubek OPVS III [-]

Délka trubky OPVS III:

$$l = \frac{S_{OPVS3}}{S_{1m}^{1428}} = \frac{1218,29}{151,21} = 8,06$$

$$\underline{l = 8,06 [\text{m}]} \quad (6.49)$$

7. Závěr

V diplomové práci se zabývám mimo jiné projekčním návrhem vstupní části ohříváku parovzduchové směsi pro flexibilní energetický systém. Flexibilní energetický systém je popsán v rešeršní části práce spolu s kotli na pevná paliva, které lze v tomto systému použít. Dále jsem pro zadané palivo vypočítal náchylnost paliva k tvorbě struskových a popílkových nánosů, přičemž jsem uvedl návrh na čištění teplosměnných ploch, pokud by si to provoz vyžadoval a pro toto palivo jsem provedl stechiometrické výpočty. Problematické bylo zjistit součinitel přestupu tepla na straně parovzduchové směsi, protože hodnoty parovzduchové směsi nejsou tabelovány a musely se vypočítat. Tyto výpočty byly provedeny na základě konzultací s panem inženýrem Konvičkou.

Stěžejním bodem diplomové práce byl projekční návrh vstupní části ohříváku parovzduchové směsi. To znamená, že jsem ze zadaných parametrů paliva, tepelného výkonu roštového kotle, jak ho má ve své koncepci zvolený firma Vítkovice Power Engineering a dalších parametrů vypočítal velikost teplosměnné plochy vstupní části ohříváku parovzduchové směsi. Tato teplosměnná plocha je tvořena deskami z membránových stěn, které se vkládají do tahu kotle z přední a zadní stěny, tak aby bylo docíleno vystřídání uspořádání. Pro tuto koncepci ohříváku parovzduchové směsi z desek tvořených membránovou stěnou jsem se rozhodl na základě konzultací s vedoucím diplomové práce. U deskového ohříváku lze měnit rozteče a průměry trubek v jednotlivých deskách, protože nejsou zavěšeny na závěsných trubkách, jako je tomu u klasického závěsného, trubkového ohříváku. Další výhodou je snadnější oprava v případě poškození ohříváku, kdy lze desky od sebe odsunout nebo je zcela vyjmout z tahu kotle. Jako nevýhodu lze uvést vznik hydraulických nerovnoměrností, z důvodů rozdílných délek trubek v desce. Tento problém bych řešil tzv. clonkováním, kdy by byly v rozdělovací komoře vyvrtány otvory s clonkou, přičemž by se měnil průměr jednotlivých trubek, tím pádem by docházelo ke změně průtočného průřezu a došlo by k vyrovnání tlakových ztrát. Průměry clonek by se vypočetly na základě tlakových ztrát jednotlivých trubek, ale z důvodu rozsáhlosti práce už jsem tuto problematiku nerozváděl.

V konstrukční části práce jsem vypracoval projekční návrh vstupního ohříváku parovzduchové směsi (VAL0093 – V.02), přičemž jsem detailně zpracoval tři varianty zavěšení desek do tahu kotle (VAL0093 – V.03). K zavěšení doporučuji variantu C, která je konstrukčně jednoduchá a pokud dojde k poškození desky lze tuto desku jednoduše vyjmout a opravit.

Seznam obrázků

<i>Obr. 2-1 Schéma flexibilního energetického systému</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2 Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti fluidační tekutiny</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-3 Kotel s výtavným jednoprostorovým ohništěm</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-4 Kotel s výtavným dvouprostorovým ohništěm</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-5 Granulační kotel s čelními hořáky</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-6 Granulační kotel věžový</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-7 Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-8 Princip ohniště s cirkulující fluidní vrstvou</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-9 Fluidní kotel s klasickým cyklonem bez externího výměníku tepla.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-10 Fluidní kotel s modifikovaným odlučovačem bez ex. výměníku tepla</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2-11 Fluidní kotel s odlučovací mříží bez externího výměníku tepla.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2-12 Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou a ex. výměníkem tepla</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2-13 Části roštového ohniště</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2-14 Pevný rovinný rošt.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2-15 Stupňový rošt</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2-16 Pásový rošt bez pohazování paliva.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 2-17 Pásový rošt s pohazováním paliva</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2-18 Přesuvný rošt</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 2-19 Vratisuvný rošt</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2-20 Roštový kotel o výkonu 100 t/h</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-1 Rotační parní ofukovač.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3-2 Akustické jednotky</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3-3 Akustický generátor</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 3-4 Složení vlhkých spalin minimálních.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 3-5 Složení suchých spalin minimálních.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 3-6 Složení vlhkých spalin skutečných</i>	<i>51</i>

<i>Obr. 3-7 Složení suchých spalin skutečných</i>	53
<i>Obr. 4-1 Definice parovzduchové směsi</i>	54
<i>Obr. 5-1 Barbotáž</i>	60
<i>Obr. 5-2 Schéma voda - pára</i>	60
<i>Obr. 6-1 Koncepce ohříváku parovzduchové směsi dle VPE.....</i>	61
<i>Obr. 6-2 Princip konstrukce vstupní části OPVS III</i>	62
<i>Obr. 6-3 Uspořádání desek OPVS III</i>	64
<i>Obr. 6-4 Deska OPVS III</i>	66

Seznam tabulek

<i>Tab. 2-1 Orientační data roštových kotlů</i>	35
<i>Tab. 3-1 Náchylnost paliva k tvorbě nánosů</i>	38
<i>Tab. 3-2 Doporučené hodnoty maximálního poměrného objemu tříatomových plynů pro pevná a kapalná paliva</i>	43
<i>Tab. 3-3 Korekce prvkového rozboru</i>	44

Seznam příloh

VAL0093 – V.01
 VAL0093 – V.02
 VAL0093 – V.03

Seznam použité literatury

- [1] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I.* Ostrava : VŠB – TUO, 2002. 116 s.
ISBN 80-248-0076-4
- [2] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II.* Ostrava : VŠB – TUO, 1999. 152 s.
ISBN 80-7078-681-7
- [3] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků.* Praha : ČVUT, 2007.
212 s. ISBN 978-80-01-03757-7
- [4] VALIGURA, Ondřej. *Palivový diagram pro kotel bloku 200 MW el. Tušimice :*
bakalářská práce. Ostrava : VŠB – TUO, Fakulta strojní, 2013. 45 s.
Vedoucí bakalářské práce Ladislav Vilimec.
- [5] DOLEŽAL, R. – LISÝ, M. – MOSKALÍK, J. www.tzb-info.cz [online]. 2.4.2014,
poslední revize 2.4.2012 [cit. 2015-02-15]
<http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8438-kotle-2-cast>
- [6] KIELAR, Jan. *Návrh na řešení čištění teplosměnných ploch u kotlů na spalování
biomasy :* bakalářská práce. Ostrava : VŠB – TUO, Fakulta strojní, 2014. 43 s.
Vedoucí bakalářské práce Bohumír Čech
- [7] Autor neznámý. www.nirafon.com [online]. [cit. 2015.5.5]
Dostupný na <http://www.nirafon.com/products>
- [8] Firemní literatura Vítkovice Power Engineering, Ostrava a.s.
- [9] VILIMEC, L. – KONVIČKA, J. – JÍLEK R. *Možnost akumulace elektřiny
kogeneračních / třígeneračních decentralizovaných energetických zdrojů.* Ostrava,
2012. 4 s.
- [10] MILČÁK, P. *Termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi*
Vítkovice Power Engineering a.s., 2009
- [11] Firemní literatura firmy Clyde Bergemann Power Group