

SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ NA TUHÁ PALIVA

- spalování tuhých paliv probíhá heterogenní reakcí na povrchu částic
- klíčovým problémem je transport kyslíku k tomuto povrchu => reakce vždy rychle přechází do difúzního režimu hoření
- spalovací systémy je možné klasifikovat
 - podle způsobu dopravy paliva do ohniště
 - podle vzduchových poměrů, přesněji podle vzájemného pohybu paliva a okysličovadla

1

1

Druhy spalování podle vzájemného pohybu paliva a okysličovadla

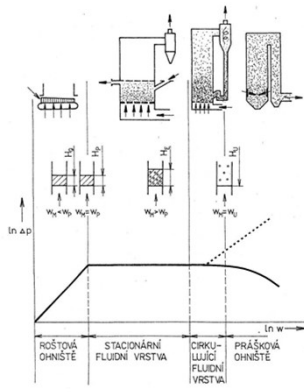
Podle vzájemného pohybu okysličovadla s palivem lze dělit spalování tuhých paliv na

- filtrační - spalování v nehybné vrstvě na roštu,
- fluidní - ve vznosu - (mezní případ mezi spalováním filtračním a v letu)
- v letu - v prostoru - práškové spalování uhlí, (jinak též spalování kapalných i plynných paliv),
- vířivé (cyklonové).

2

2

Klasifikace ohnišť na tuhá paliva

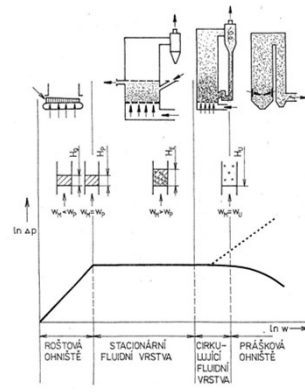


- Spalování filtrační (ve vrstvě)
- H_0 je klidová výška vrstvy paliva
 - vrstvou protéká spalovací vzduch
 - rychlost vzduchu je dána velikostí mezer mezi částicemi vrstvy
 - w_M je tzv. mimovrstvová rychlost vzduchu
 - s rostoucí rychlostí w_M roste rychlost difúze kyslíku k povrchu částic a rychlost hoření
 - současně roste odpor vrstvy a tedy tlaková ztráta ve vrstvě Δp

3

3

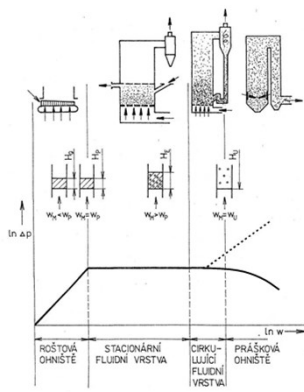
Klasifikace ohnišť na tuhá paliva



- Spalování ve vznosu (fluidní)
- při dosažení určité rychlosti proudícího vzduchu je dosaženo rovnováhy mezi dynamickým účinkem proudícího vzduchu na částici a gravitační silou = částice se ocitá ve vznosu
 - soustava částic ve vznosu tvoří fluidní vrstvu
 - rychlost, při níž je tohoto stavu dosaženo, je prahová rychlost fluidizace w_p
 - vytvoří se fluidní vrstva o výšce $H_f \approx H_0$
 - částice paliva jsou nadále nehybné
 - rychlost přísunu kyslíku k povrchu částic je dána rychlostí proudění vzduchu v mezerách mezi částicemi

4

Klasifikace ohnišť na tuhá paliva

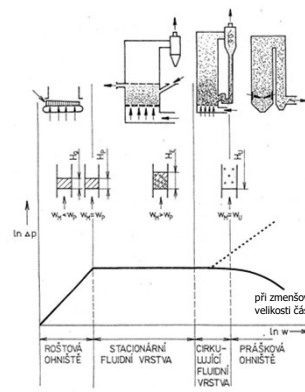


- Spalování ve vznosu (fluidní)
- při dalším zvyšování rychlosti vzduchu se vytvoří tzv. expandovaná fluidní vrstva o výšce H_E
 - částice se ve vrstvě intenzivně přemísťují, což podporuje rychlost hoření
 - H_E s rostoucí rychlostí vzduchu mírně narůstá, mezery mezi částicemi se zvětšují, tlaková ztráta příliš neroste
 - je nutné zajistit, že nebude dosaženo teploty měknutí popeloviny, aby nedocházelo k slepování (spékání) částic
 - nutné řešit otázku únosu jemnějších frakcí z vrstvy - nízkou zvýšení nedopalu v úletu
 - osvědčeným řešením je zvýšení fluidizační rychlosti a přechod k cirkulující fluidní vrstvě

5

5

Klasifikace ohnišť na tuhá paliva



- Spalování v letu (práškové)
- další zvýšení rychlosti proudění v ohništi nad úletovou rychlost částic w_{UJ} vytváří situaci, kdy je částice unášena vzduchospalninovou směsí ohništěm
 - během průletu vyhořívá na konečný nedopal
 - k dispozici pro vyhoření částice je omezený čas několika sekund => je nutné palivo dodávat ve formě prášku
 - u práškového ohniště je nutné dosáhnout vyšší spalovací teploty, aby bylo zajištěno vyhoření částice při průletu ohništěm

6

6

SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ NA TUHÁ PALIVA

- Spalovací zařízení se skládá
 - z ohniště s hořáky nebo s roštěm
 - z pomocných zařízení
 - zařízení k přípravě paliva ke spalování,
 - zařízení k zachycování a odstraňování tuhých zbytků po spalování,
 - z ohříváků spalovacího vzduchu,
 - ze sacích a vzduchových ventilátorů,
 - odlučovačů popílku,
 - komína,
 - ofukovačů atd.

7

7

Ohniště

- je to prostor vymezený nechlazenými keramickými stěnami a/nebo výhřevnými plochami, v němž se průběžně spaluje požadované množství paliva za účelem uvolnění potřebného toku tepla

Ohniště musí splňovat celou řadu požadavků, z nichž nejdůležitější jsou:

- zajištění dokonalého průběžného spalování přiváděného paliva s optimálním přebytkem spalovacího vzduchu a s nejvyšší možnou účinností při minimální tvorbě škodlivých emisí
- zajistit kontinuální odvod tuhých zbytků po spalování a plyných spalin do dalších částí kotle
- vhodnou konfigurací výhřevných ploch zajistit vychlazení spalin pod teplotu měknutí popelovin a aby nebyla překročena určitá teplota stěny přehřívákových trubek, popř. nebyly v ohništi místně vysoké teploty

8

8

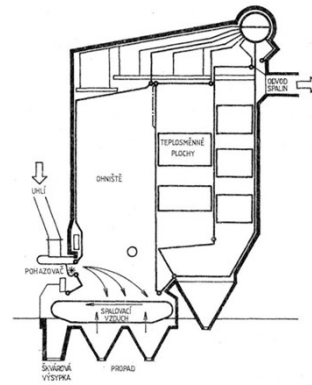
Ohniště

- ohniště musí být těsné, aby při případném přetlaku neunikaly spaliny do prostoru kotelny a při podtlaku se zbytečně nepřisával falešný vzduch
- musí umožnit co nejširší palivový program, aniž by vznikly provozní potíže nebo příliš poklesla účinnost kotle
- nesmí docházet k nadměrné tvorbě nánosů a korozi, ucpávání průtočných, výpustních a recirkulačních průřezů apod.
- ohniště má mít jednoduchou a účinnou regulaci výkonu v co nejširším rozmezí
- stabilita hoření musí být dobrá jak při stacionárních, tak i při přechodových stavech, jmenovitě v blízkosti minimálního výkonu
- obestavěný objem a půdorysná plocha mají být minimální
- opotřebení jednotlivých částí ohniště opalem, erosi a korozi musí být přiměřené
- ztráty tepla do okolí a cena izolace musí být minimální

9

9

Roštové ohniště s pásovým roštěm a pohazováním paliva



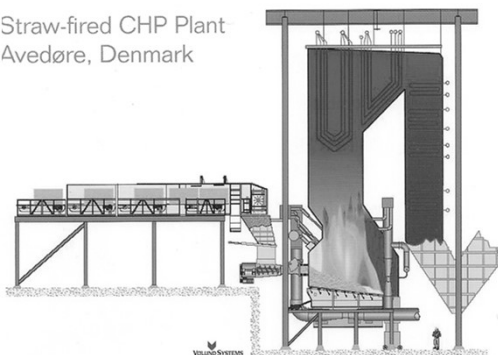
- převládající typ ohniště pro menší výkony
- pro ideální provoz vyžaduje tříděné uhlí
- mnohem častěji je spalován hruboprach a směsí obsahující zvýšený podíl jemných frakcí
- obvyklým řešením bývá v tomto případě roštový kotel s pohazováním paliva
- spalování na roštu se uplatňuje při spalování odpadů a biomasy

10

10

Roštové ohniště s vibračním roštěm na spalování slámy

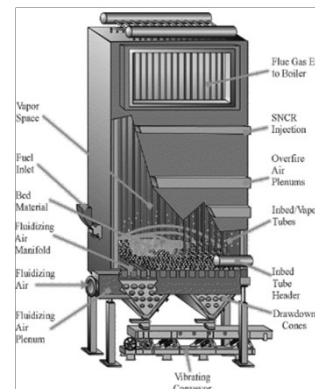
Straw-fired CHP Plant
Avedøre, Denmark



11

11

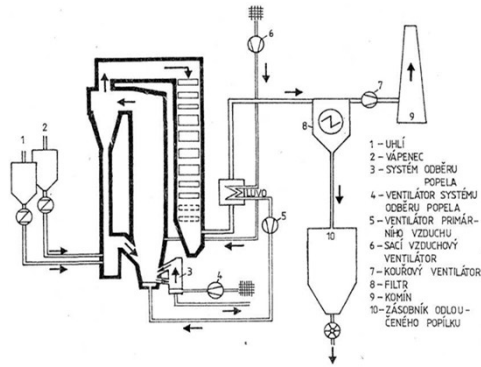
Ohniště se stacionární fluidní vrstvou



12

12

Ohniště s cirkulující fluidní vrstvou

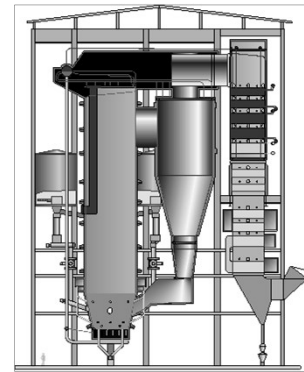


- 1 - UHLÍ
- 2 - VÁPENEC
- 3 - SYSTÉM ODBĚRU POPELA
- 4 - VENTILÁTOR SYSTÉMU ODBĚRU POPELA
- 5 - VENTILÁTOR PRIMÁRNÍ VZDUCHU
- 6 - SÁČÍ VZDUCHOVÝ VENTILÁTOR
- 7 - KOUŘOVÝ VENTILÁTOR
- 8 - FILTR
- 9 - KAMIN
- 10 - ZÁSOBNÍK ODLOUČENÉHO POPLUKU

13

13

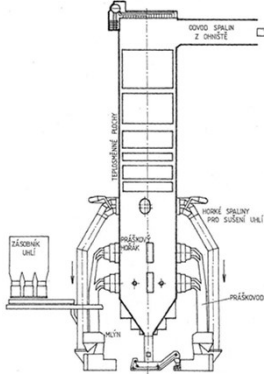
Kotel s ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou



14

14

Práškové ohniště

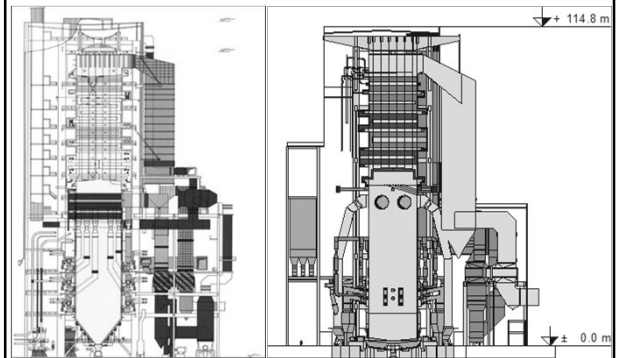


- uhlí je z kotlového zásobníku dopravováno do sušky, kterou směrem ke mlýnu proudí horké spaliny, odebrané z ohniště
- uhlí se vysušuje, mele a vytříbený uhelný prášek je dopravován do práškových hořáků, do kterých je současně přiváděn ohřátý spalovací vzduch
- prášek se zapaluje a vyhořívá a vzniklé spaliny předávají teplo v teplosměnných plochách na stěnách ohniště a v horní části v prostoru ohniště
- ochlazené spaliny jsou vedeny k čistění a poté do kominu

15

15

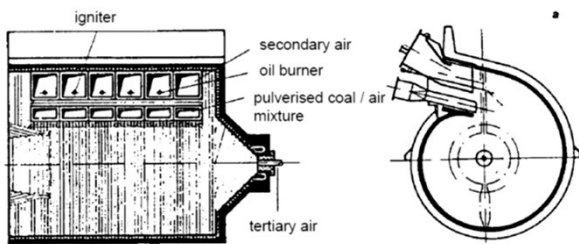
Práškový kotel



16

16

Cyklonové ohniště



17

17

Tepelná bilance ohniště

- teplo přivedené

- teplo uvolněné v ohništi

$$Q_H = Q_{pv} + Q_T \quad [kW]$$

- teplo přivedené v palivu

$$Q_{pv} = M_{pv} \cdot [(1 - Z_N) \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv}] \quad [kW] \quad Z_N - \text{ztráty nedopalem}$$

- teplo v ohřátém vzduchu

$$Q_T = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot O_T \cdot c_T \cdot t_T = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot \alpha_o \cdot O_{TVmin} \cdot c_T \cdot t_T = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot \alpha_o \cdot I_T \quad [kW]$$

- teplo v recirkulovaných spalinách

$$Q_r = r \cdot M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{Sr} \cdot c_{Sr} \cdot t_{Sr} = r \cdot M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot [O_{STmin} + (\alpha_r - 1) \cdot O_{TVmin}] \cdot c_{Sr} \cdot t_{Sr} = r \cdot M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot I_S^{Sr, \alpha_r} \quad [kW]$$

sočinitel poměrné recirkulace r udává podíl recirkulovaných spalin k celkovému průtoku v místě odběru

18

18

Tepelná bilance ohniště

- teplo odvedené
 - teplo odcházející v plynných spalínách z ohniště

$$Q_{ok} = M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{SoK} \cdot c_{SoK} \cdot t_{SoK} =$$

t_{SoK} – teplota spalin na výstupu z ohniště

$$= M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot (1 + r) \cdot [O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{Vmin}] \cdot c_{SoK} \cdot t_{SoK} =$$

$$= M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot (1 + r) \cdot I_S^{t_{SoK}, \alpha_{ok}} \quad [kW]$$

- teplo odváděné v tuhých spalínách

$$Q_f = \sum M_{pv} \cdot \frac{A}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot c_i \cdot t_i \quad [kW]$$

- i = šk, str, pop
- A [kg/kg] obsah popela v palivu
- C_i [kg/kg] nespálený uhlík
- X_i [kg/kg] podíl, který přechází ve škváru, struku a popílek

19

19

Tepelná bilance ohniště

- teplo odvedené
 - teplo předané do stěn ohniště sáláním (konvekce se neuvažuje)

$$Q_{st} = \varepsilon_o \cdot C_o \cdot S_u \cdot (\bar{T}_o^4 - \bar{T}_{st}^4) = \bar{q}_{st} \cdot S_u \quad [kW]$$

kde je

ε_o – stupeň černosti ohniště

C_o – Stefan-Boltzmannova konstanta

S_u – účinná plocha stěn ohniště

\bar{T}_o – střední teplota spalin v ohništi

\bar{T}_{st} – střední teplota povrchu stěn v ohništi

Z tepelné bilance ohniště lze teplo předané v ohništi do stěn a teplotu odcházejících spalin spočítat

20

20

Teplo předané v ohništi

Tepelná bilance ohniště má tvar (Q_f zanedbáno)

$$M_{pv} \cdot (\eta_o \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv}) + M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot O_V \cdot c_V \cdot t_V +$$

$$+ M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{Sp} \cdot c_{Sp} \cdot t_{Sp} - M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{SoK} \cdot c_{SoK} \cdot t_{SoK} =$$

$$= \varepsilon_o \cdot C_o \cdot S_u \cdot (\bar{T}_o^4 - \bar{T}_{st}^4) = \bar{q}_{st} \cdot S_u \quad [kW]$$

při poměrné recirkulaci $r = O_{Sp} / O_S$ a součiniteli přebytku vzduchu v ohništi $\alpha_o = \text{konst.}$ lze vztah upravit na tvar

$$M_{pv} \cdot \left\{ \eta_o \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv} + (1 - Z_N) \cdot O_V \cdot c_V \cdot t_V + \right.$$

$$\left. + (1 - Z_C) \cdot O_S \cdot \bar{c}_S \cdot [r \cdot t_{Sp} - (1 + r) \cdot t_{SoK}] \right\} = \bar{q}_{st} \cdot S_u \quad [kW]$$

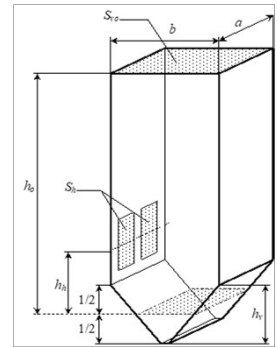
toto je výsledek teoretického řešení úlohy

21

21

Návrh velikosti a tvaru ohniště

- návrh velikosti a tvaru ohniště je více méně empirickou záležitostí
- vychází se ze zkušeností zohledňujících
 - výkon kotle
 - druh paliva
 - použitou spalovací technologii
- pro usnadnění návrhu ohniště byla zavedena porovnávací kritéria



22

22

Porovnávací kritéria ohnišť

Střední objemové zatížení ohniště

- charakterizuje intenzitu uvolňování tepla v ohništi
- počítá se podle vztahu

$$q_v = \frac{M_{pv} \cdot Q_i}{V_o} \quad [kW \cdot m^{-3}]$$

- M_{pv} [kg/s] je množství přivedeného paliva při jmenovitém výkonu kotle,
- Q_i [kJ/kg] je výhřevnost paliva
- V_o [m³] je objem spalovací komory.

23

23

Střední objemové zatížení ohniště

- klesá
 - s klesajícím výkonem
 - s klesající výhřevností
 - s rostoucím jmenovitým výkonem kotle
- závisí na typu ohniště

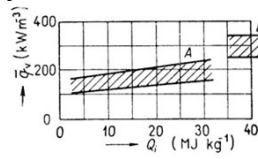
Ohniště	q_v [kW/m ³]
Roštová	100 ÷ 200
Granulační	120 ÷ 250
Výtavná	150 ÷ 300
Svislá cyklónová	800 ÷ 1200
Vodorovná cyklónová	3000 ÷ 6000
Olejová	200 ÷ 1000
Plynová	200 ÷ 1000

24

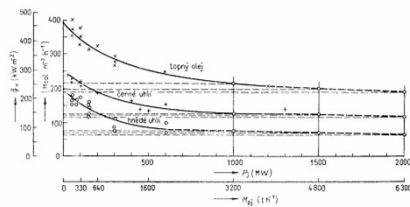
24

Střední objemové zatížení ohniště

- vliv výhřevnosti
 - A – uhlí
 - B – olej



- vliv výkonu

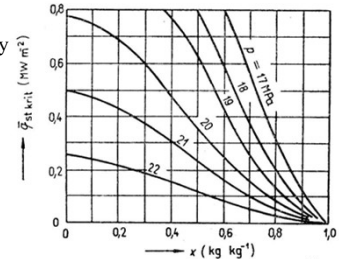


25

Střední měrný tepelný tok do stěn

$$\bar{q}_{st} = \frac{Q_{st}}{S} \quad [kW \cdot m^{-2}]$$

- vysoký q_{st} může být příčinou přehřátí materiálu trubek varnic
 - nastává var ve filmu – horší chlazení stěny
 - kritický tok závisí na tlaku



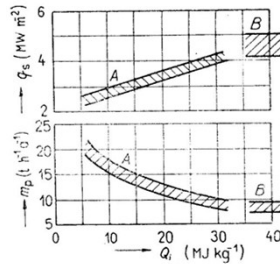
26

Měrné průřezové zatížení ohniště Měrný šířkový parní výkon

$$\bar{q}_s = \frac{M_{pv} \cdot Q_v}{S_o} \quad [kW \cdot m^{-2}]$$

$$m_p = \frac{M_{pj}}{a} \quad [t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}]$$

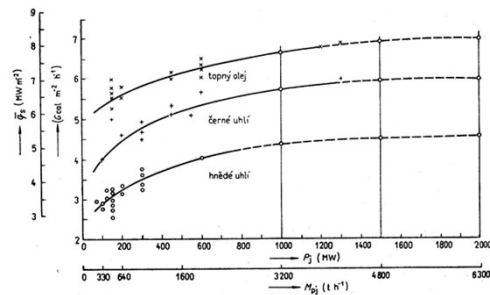
- slouží k navrhování, popř. ke kontrole
 - průřezu S [m]
 - šířky a [m]
- A – uhlí
- B – olej



27

Měrné průřezové zatížení ohniště

- závislost na výkonu



28

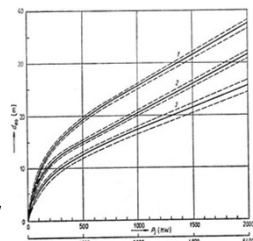
Ekvivalentní průměr ohniště

$$d_e = \frac{4 \cdot S_o}{O} \quad [m]$$

- pro průřez ohniště ve tvaru
 - čtverce $d_e = a$
 - kruhu $d_e = d$
 - obdélníka

$$d_e = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad [m]$$

- d_e musí růst se vzrůstajícím jmenovitým výkonem kotle, aby nedošlo k opalu nebo zaškvrňování stěn



1-HU, 2-ČU, 3-ZP,olej

29

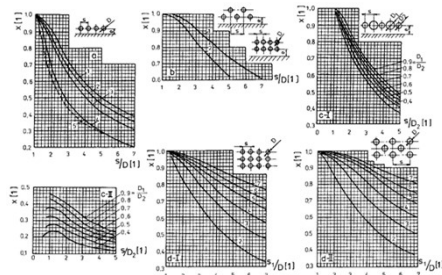
Velikost výhřevné plochy S umístěné v ohništi

- nemusi být totožná s geometrickým povrchem stěn ohniště S_g
- závisí
 - na součiniteli geometrického uspořádání ζ
 - na součiniteli zanesení ζ (resp. využití)
- účinná sálavá plocha efektivní pro přestup tepla se určí jako

$$S_{II} = \zeta \cdot S = \zeta \cdot x \cdot S_g \quad [m^2]$$

30

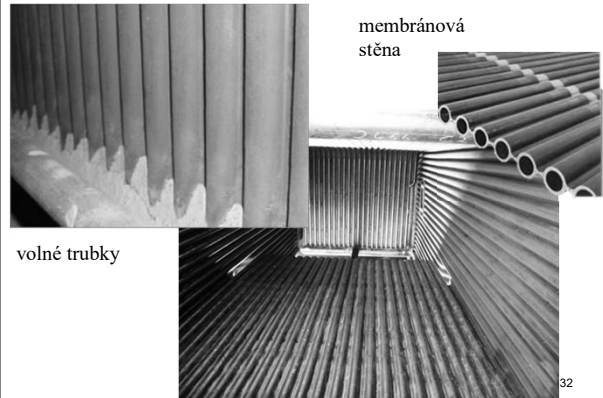
Velikost výhřevné plochy S umístěné v ohništi součiniteli geometrického uspořádání x



- a – jednořadá stěna z hladkých trubek : I – s vlivem sálání obezdívky pro $e \geq 1,4 \cdot D$, 2 – dttto pro $e = 0,8 \cdot D$, 3 – dttto pro $e = 0,5 \cdot D$, 4 – dttto pro $e = 0,5$ – bez vlivu sálání obezdívky pro $e \geq 0,5 \cdot D$
- b – dvouřadá stěna z hladkých trubek : I – s vlivem sálání obezdívky pro $e \geq 1,4 \cdot D$, 2 – dttto pro $e = 0$
- c – jednořadá stěna z hladkých trubek různého průměru : I – pro celou stěnu, II – pro trubky malého průměru
- d – víceřadý svazek ($z = 2$ až 7 řad) : I – uspořádání trubek za sebou, II – uspořádání trubek vystřídané

31

Provedení chlazených stěn kotle

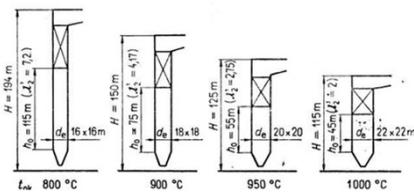


32

Výška ohniště

$$h_o = \frac{V_o}{S_o} = \frac{\bar{q}_z}{\bar{q}_v} \quad [m]$$

- závisí na
 - jmenovité výkonnosti M_{pj} (tj. vlastně na d_e)
 - na vychlazení ohniště = tedy na předaném teple do stěn
 - teplotě spalovacího vzduchu a recirkulaci spalin => určují t_{np} a t_{ok}
- Závislost h_o a d_e granulačního ohniště na teplotě spalin v místě odchodu z ohniště (blok 600 MW na hnědé uhlí)



33

Účinnost ohniště

$$\eta_o = 1 - Z_N - Z_f - Z_{zvo} = \frac{[M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_S \cdot c_S \cdot t_{np}] \cdot (1 - Z_{zvo})}{M_{pv} \cdot Q_i}$$

- vyjadřuje podíl tepla přivedeného v palivu do ohniště, který je obsažen ve spalinách před odevzdáním tepla do výhřevných ploch
- závisí na ztrátách
 - nedokonalosti spalování $Z_N = Z_C + Z_{CO}$
 - nedokonalosti izolace ohniště Z_{zvo}
 - fyzickým teplem tuhých spalin Z_f odevádaných z ohniště ve formě strusky a škváry

34

Teplota nechlazeného plamene

vyjde z tepelné bilance ohniště v případě, kdy odvedené teplo do stěn a ve spalinách = 0

$$t_{np} = \frac{\eta_o \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv} + (1 - Z_N) \cdot O_V \cdot c_V \cdot t_V + (1 - Z_C) \cdot r \cdot O_S \cdot c_S \cdot t_S}{(1 - Z_C) \cdot (1 + r) \cdot O_S \cdot c_{So}} \quad [^{\circ}C]$$

při zanedbání citelného tepla paliva, rozdílu mezi $(1 - Z_N)$, $(1 - Z_C)$ a η_o a bez recirkulace spalin platí

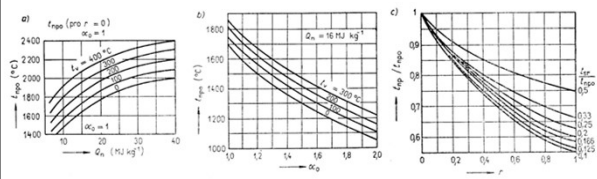
$$t_{np} = \frac{Q_i + O_V \cdot c_V \cdot t_V}{O_S \cdot c_{So}} \quad [^{\circ}C]$$

35

Teplota nechlazeného plamene

závisí

- na výhřevnosti,
- na teplotě vzduchu, součiniteli přebytku vzduchu v ohništi
- na poměrné recirkulaci a teplotě recirkulovaných spalin



36

35

36

Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{(1 - Z_c) \cdot M_{pv} \cdot O_s \cdot \bar{c}_s \cdot (1 + r)}{\sigma \cdot S_u \cdot T_{np}^3}$$

- je podobnostní kritérium přenosu tepla v ohništi vytvořené pro jeho návrh
- závisí
 - na průtoku spalin
 - na jejich střední měrné tepelné kapacitě c_s (J/m³K) v rozsahu teplot t_{np} až t_{ok}
 - na poměrné recirkulaci spalin do ohniště
 - na účinné sálavé ploše S_u (m²)
 - na univerzální Stefanově - Boltzmannově konstantě $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴
 - na teplotě nechlazeného plamene T_{np} (K)

37

37

Teplota spalin na konci ohniště

dosazením Boltzmannova kritéria a bezrozměrných teplot $\Theta_i = T_i / T_{np}$ ($i = ok, st, o$) do tepelné bilance ohniště získáme vztah

$$\frac{Bo}{\bar{\epsilon}_o} \cdot (\Theta_o - 1) - \Theta_{ok}^2 - \Theta_{st}^4 = 0$$

řešením vychází teoretická bezrozměrná teplota spalin na konci ohniště

$$\Theta_{ok1,2} = \left(\frac{T_{ok}}{T_{np}} \right)_{1,2} = \frac{Bo}{2 \cdot \bar{\epsilon}_o} \pm \sqrt{\left(\frac{Bo}{2 \cdot \bar{\epsilon}_o} \right)^2 + \Theta_{st}^4 + \frac{Bo}{\bar{\epsilon}_o}}$$

38

38

Teplota spalin na konci ohniště

- na základě měření velkého počtu ohnišť zjistil Gurvič experimentální závislost

$$\Theta_{ok} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot \bar{\epsilon}_o^{0,6} + Bo^{0,6}}$$

- M je součinitel respektující výškovou polohu hořáků resp. polohu maximálního tepelného toku
- teplota spalin na konci ohniště se pak vypočte jako

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon}_o}{Bo} \right)^{0,6}} - 273,15 \quad [^{\circ}C]$$

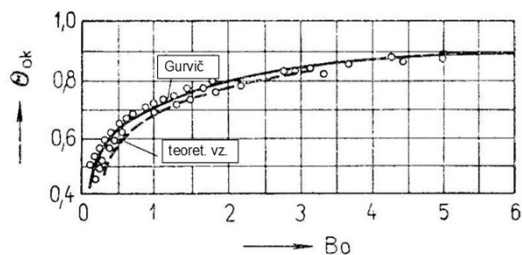
vztah lze použít při spalování všech druhů paliv ve všech typech ohnišť s výjimkou fluidních

39

39

Teplota spalin na konci ohniště

porovnání výsledků podle teoretického a Gurvičova vztahu



40

40