

## SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ NA TUHÁ PALIVA

- spalování tuhých paliv probíhá
  - kinetickým vyhoříváním prchavé hořlaviny
  - heterogenními reakcemi na povrchu částic
- klíčovým problémem je transport kyslíku k povrchu částic paliva => 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 oksyličovadla

1

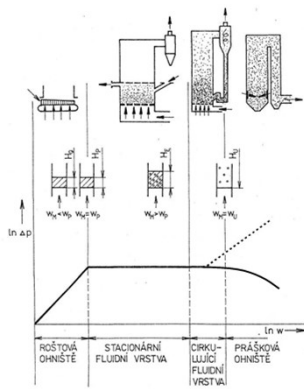
## Druhy spalování podle vzájemného pohybu paliva a oksyličovadla

Podle vzájemného pohybu oksyličovadla 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),

2

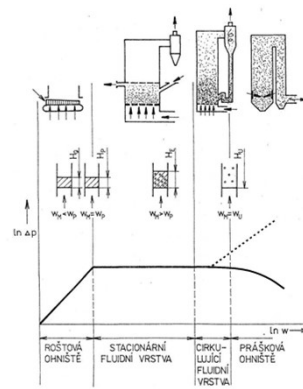
### Klasifikace ohnišť na tuhá paliva



- 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  $\Delta p$

3

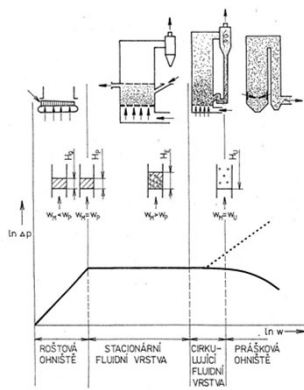
### Klasifikace ohnišť na tuhá paliva



Spalování ve vznosu (fluidní)

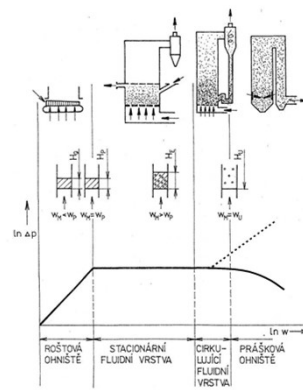
- při dosažení určité rychlosti proudícího vzduchu je dosaženo rovnováhy mezi dynamickým účinkem proudícího vzduchu na částici a gravitační silou = částice se ocitá ve vznosu
- soustava částic ve vznosu tvoří fluidní vrstvu
- rychlost, při níž je tohoto stavu dosaženo, je prahová rychlost fluidizace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

### 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 nímě 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
    - řešit otázku únosu jemnějších frakcí z vrstvy - riziko zvýšení nedopalu v úletu
  - osvědčeným řešením je zvýšení fluidizační rychlosti a přechod k cirkulující fluidní vrstvě

### Klasifikace ohnišť na tuhá paliva

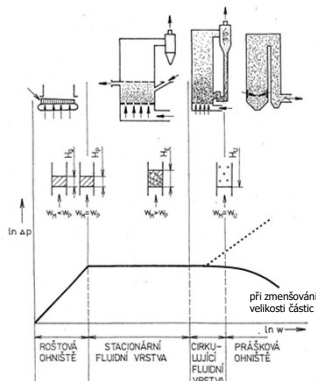


Spalování ve vznosu (fluidní)

- cirkulující fluidní vrstva = silně expandovaná fluidní vrstva, která zaplní celý objem spalovací komory
- tím dojde k intenzivnímu odvodu tepla do celého povrchu obvodových stěn spalovací komory a stabilizaci teploty fluidní vrstvy na nízké úrovni
- část materiálu fluidní vrstvy opouští se spalnými spalovací komorou
- za spalovací komorou musí být zarazen separátor tuhých částic (cyklon), který je zachytí pro zpětný návrat, proto označení cirkulující fluidní vrstva

6

## Klasifikace ohnišť na tuhá paliva



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

7

## SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ NA TUHÁ PALIVA

- Spalovací zařízení se skládá
  - z ohniště (spalovací komory) s roštem nebo s hořáky
  - 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.

8

## 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

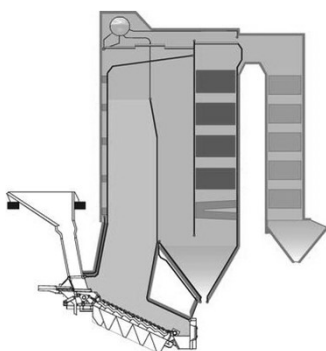
9

## 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

10

## Roštové ohniště s přesuvným roštem

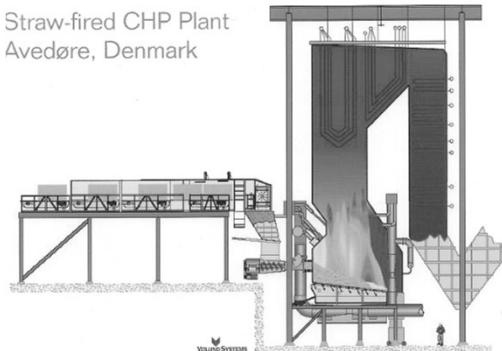


- převládající typ ohniště pro výkony do 50 MWt
- palivo se přivádí na rošt z násypky
- odhořívá ve vrstvě filtračním způsobem
- v minulosti převažující technologie pro spalování uhlí
- dnes se uplatňuje při spalování odpadů a biomasy

11

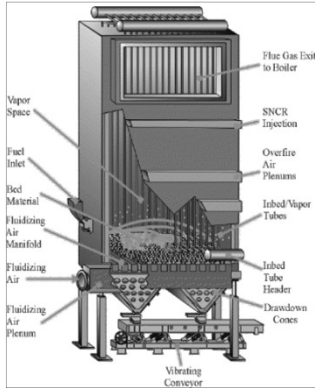
## Roštové ohniště s vibračním roštem na spalování slámy

Straw-fired CHP Plant  
Avedøre, Denmark



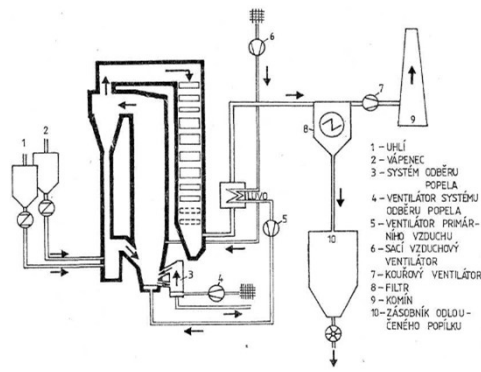
12

### Ohniště se stacionární fluidní vrstvou



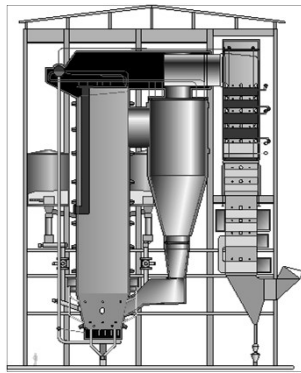
13

### Ohniště s cirkulující fluidní vrstvou



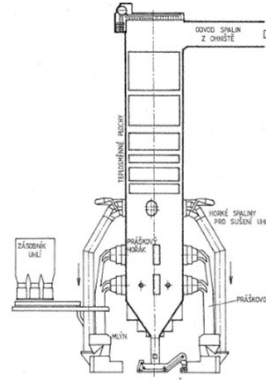
14

### Kotel s ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou



15

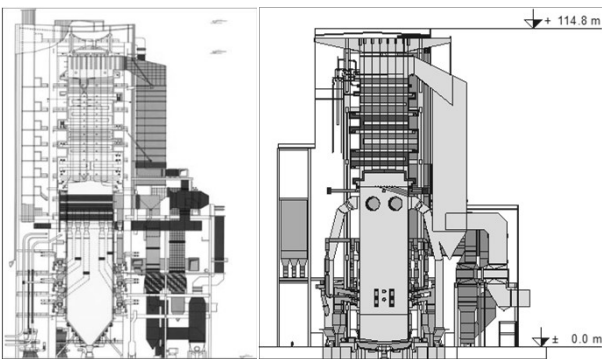
### Práškové ohniště



- uhlí je z kotlového zásobníku dopravováno do sušky, kterou směrem ke mlynu proudí horké spaliny, odebráné z ohniště
- uhlí se vysušuje, mele a vytříděný 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 čištění a poté do komína

16

### Práškový kotel



17

### Tepelná bilance ohniště

#### ■ teplo přivedené

##### ■ teplo uvolněné v ohništi

$$Q_{II} = Q_{pv} + Q_v \quad [kW]$$

##### ■ 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

$$Q_v = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot O_v \cdot c_v \cdot t_v = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot \alpha_o \cdot O_{vTmin} \cdot c_v \cdot t_v = M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot \alpha_o \cdot I_v \quad [kW]$$

##### ■ teplo v recirkulovaných spalinách

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

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

18

### Tepelná bilance ohniště

- teplo odvedené
  - teplo odcházející v plynných spalínách z ohniště

$$\begin{aligned}
 Q_{ok} &= M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{Sok} \cdot c_{Sok} \cdot t_{Sok} = \\
 &= M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot (1 + r) \cdot [O_{S'Vmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{V'Vmin}] \cdot c_{Sok} \cdot t_{Sok} = \\
 &= M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot (1 + r) \cdot I_S^{t_{Sok}, \alpha_{ok}} \quad [kW]
 \end{aligned}$$

$t_{Sok}$  – teplota spalin na výstupu z ohniště

- 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

### 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

- $\varepsilon_o$  – 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

### Teplo předané v ohništi

Tepelná bilance ohniště má tvar ( $Q_f$  zanedbáno)

$$\begin{aligned}
 &M_{pv} \cdot (\eta_o \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv}) + M_{pv} \cdot (1 - Z_N) \cdot O_V \cdot c_V \cdot t_V + \\
 &+ M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{S'} \cdot c_{S'} \cdot t_{S'} - M_{pv} \cdot (1 - Z_C) \cdot O_{Sok} \cdot c_{Sok} \cdot t_{Sok} = \\
 &= \varepsilon_o \cdot C_o \cdot S_u \cdot (\bar{T}_o^4 - \bar{T}_{st}^4) = \bar{q}_{st} \cdot S_u \quad [kW]
 \end{aligned}$$

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

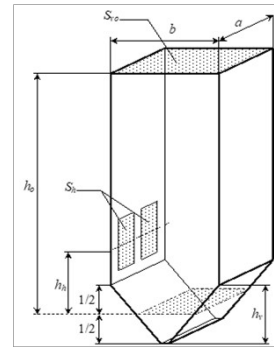
$$\begin{aligned}
 &M_{pv} \cdot \left\{ \eta_o \cdot Q_i + c_{pv} \cdot t_{pv} + (1 - Z_N) \cdot O_V \cdot c_V \cdot t_V + \right. \\
 &\left. + (1 - Z_C) \cdot O_S \cdot \bar{c}_S \cdot [r \cdot t_{S'} - (1 + r) \cdot t_{Sok}] \right\} \doteq \bar{q}_{st} \cdot S_u \quad [kW]
 \end{aligned}$$

toto je výsledek teoretického řešení úlohy

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

### 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
- $V_o$  [m<sup>3</sup>] je objem spalovací komory.

23

#### Střední objemové zatížení ohniště

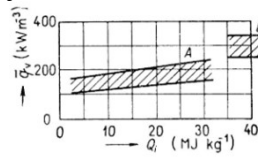
- klesá
  - s klesajícím výkonem
  - s klesající výhřevností
  - s rostoucím jmenovitým výkonem kotle
- závisí na typu ohniště

Ohniště	$q_v$ [kW/m <sup>3</sup> ]
Roštová	100 ÷ 200
Prášková	120 ÷ 250
Olejová	200 ÷ 1000
Plynová	200 ÷ 1000

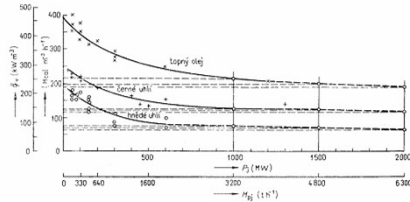
24

### Střední objemové zatížení ohniště

- vliv výhřevnosti
  - A – uhlí
  - B – olej



- vliv výkonu

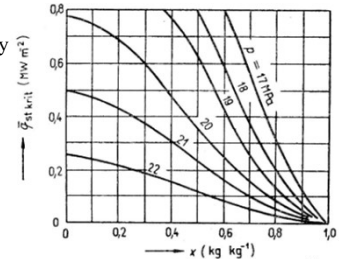


25

### 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



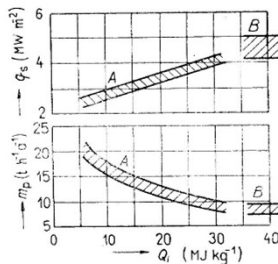
26

### Měrné průřezové zatížení ohniště Měrný šířkový parní výkon

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

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

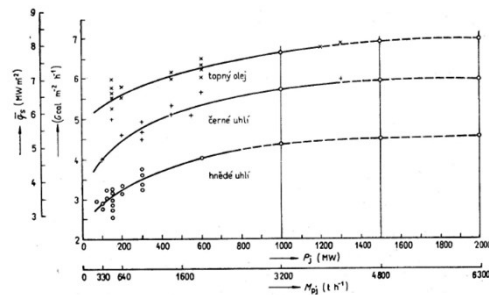
- slouží k navrhování, popř. ke kontrole
  - průřezu  $S$  [m]
  - šířky  $a$  [m]
- A – uhlí
- B – olej



27

### Měrné průřezové zatížení ohniště

- závislost na výkonu



28

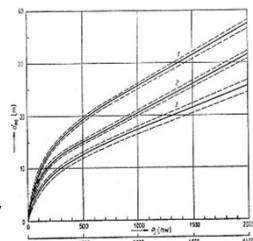
### Ekvivalentní průměr ohniště

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

- 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

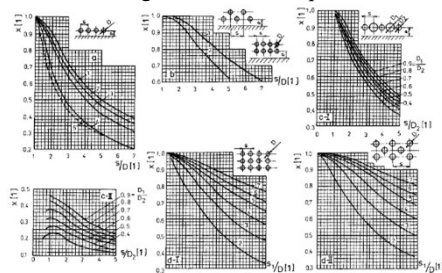
### Velikost výhřevné plochy $S$ umístěné v ohništi

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

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

30

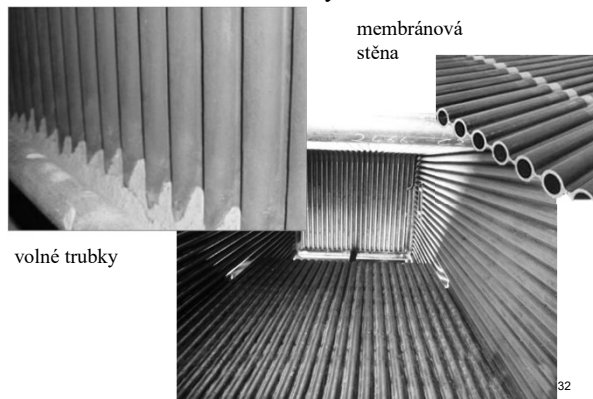
## Velikost výhřevné plochy $S$ umístěné v ohništi součinitel geometrického uspořádání $x$



- a – jednořadá stěna z hladkých trubek : 1 – s vlivem sálení obezdívky pro  $e \geq 1,4 \cdot D$ , 2 – dťto pro  $e = 0,8 \cdot D$ , 3 – dťto pro  $e = 0,5 \cdot D$ , 4 – dťto pro  $e = 0$ , 5 – bez vřivou sálení obezdívky pro  $e \geq 0,5 \cdot D$
- b – dvořadá stěna z hladkých trubek : 1 – s vřivou sálení obezdívky pro  $e \geq 1,4 \cdot D$ , 2 – dťto pro  $e = 0$
- c – jednořadá stěna z hladkých trubek řizného průměru : I – pro celou stěnu, II – pro trubky malého průměru
- d – víceřadý svazek ( $z = 2$  až 7 řad) : I – uspořádaní trubek za sebou, II – uspořádaní trubek vystřídáné

31

## Provedení chlazených stěn kotle



volné trubky

membránová stěna

32

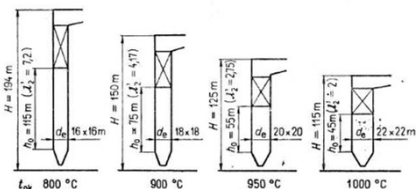
## Výška ohniště

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

### 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

## Teplota nechlazeného plamene

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

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

kde účinnost ohniště

$$\eta_o = 1 - Z_N - Z_f - Z_{svo}$$

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

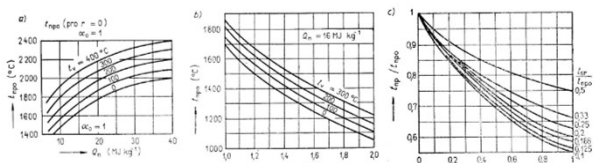
$$t_{np} = \frac{Q_i + O_V \cdot c_V \cdot t_V}{O_S \cdot c_{So}} \quad [^{\circ}C]$$

34

## Teplota nechlazeného plamene

závisí

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



35

## Boltzmannovo číslo

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

- je podobnostní kritérium přenosu tepla v ohništi vytvořené pro jeho návrh

závisí

- na průtoku spalin
- na jejich střední měrné tepelné kapacitě  $c_s$  ( $J/m^3K$ ) v rozsahu teplot  $t_{np}$  až  $t_{ok}$
- na poměrné recirkulaci spalin do ohniště
- na účinné sálové ploše  $S_u$  ( $m^2$ )
- na univerzální Stefanově - Boltzmannově konstantě  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$
- na teplotě nechlazeného plamene  $T_{np}$  (K)

36

### 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

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

řešením vychází teoretická bezrozměrná teplota spalin na konci ohniště

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

37

### Teplota spalin na konci ohniště

- na základě měření velkého počtu ohnišť zjistil Gurvič experimentální závislost

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

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

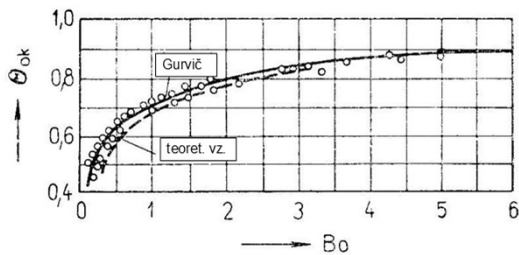
$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left( \frac{\varepsilon_o}{Bo} \right)^{0,6}} - 273,15 \quad [^{\circ}C]$$

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

38

### Teplota spalin na konci ohniště

porovnání výsledků podle teoretického a Gurvičova vztahu



39