Teoretické základy spalování

- ***Spalování*** je fyzikálně chemický pochod, při kterém probíhá organizovaná příprava hořlavé směsi paliva s okysličovadlem a jejich slučování (hoření) za intenzivního uvolňování tepla, což způsobuje prudké stoupnutí teploty směsi a vzniklých spalin. Snižuje se přitom energetický potenciál soustavy, tj. entropie soustavy roste.
- ***Hoření*** má charakter řetězového děje, při němž část spalného tepla poslouží jako iniciátor zapálení nové směsi vstupující do reakce. Může trvat
  - až do vyčerpání zásoby hořlavé směsi
  - až do vyčerpání jedné její složky
  - do okamžiku, kdy intenzívním odvodem tepla teplota směsi klesne pod zápalnou teplotu

1

Teoretické základy spalování

- hoření je možné pouze mezi elementárními složkami hořlaviny (C, H, S) v atomárním stavu a okysličovadla (nejčastěji O_2 ze vzduchu)
- atomy hořlaviny se snaží doplnit své neúplné vnější elektronové sféry na plný počet elektronů, aby vytvořily energeticky výhodnější rozmístění
- některé elektrony se stávají v nově vzniklé molekule společnými pro oba prvky, které se zúčastní spalování

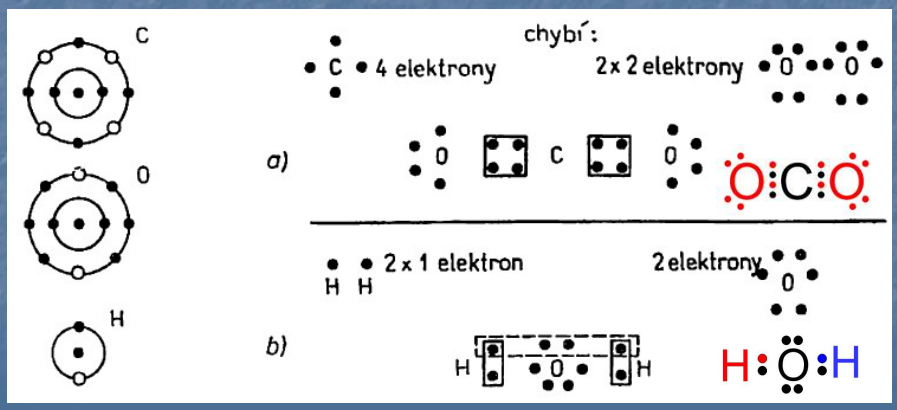
Příklad :

- atom uhlíku C má 6 elektronů rozdělených tak, že 2 jsou na 1. sféře a 4 na 2. sféře, takže 2. sféra je neúplná s deficitem 4 elektronů
- molekula kyslíku O_2 má v atomu 8 elektronů, a to 2 na 1. a 6 na 2. sféře, tj. má deficit 2 elektrony na 2. sféře
- reakcí se vytvoří molekula CO_2, u níž je celkový počet 4 + 2 x 6 = 16 vnějších elektronů umístěno podle schématu *a)* na obrázku, takže všechny atomy O i C v molekule CO_2 mají plný počet elektronů na 2. sféře, tj. 8;
- z celkových 16 elektronů na vnějších sférách je 8 společných

2

Teoretické základy spalování

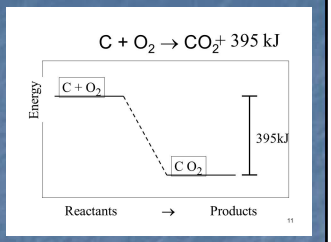
- vodík H má na jediné sféře 1 elektron, přičemž úplná sféra musí obsahovat 2 elektrony
- v molekule vody H_2O jsou podle schématu *b)* ve vnějších sférách 2 atomů vodíku H a 1 atomu kyslíku O společné 4 elektrony



3

Teoretické základy spalování

- snižování energetické hladiny elektronů při spalování hořlaviny znamená úsporu energie, která se projeví uvolněním tepla
- množství uvolněného tepla je měřítkem intenzity hoření



- označí-li se slučovací tepla paliva Q_{pv}, okysličovadla Q_o a spalin Q_{sp}, jejich molekulové hmotnosti m_{pv}, m_o, m_{sp} (kg/ mol) a počty molekul v reakci n_{pv}, n_o, n_{sp}, pak podle zákona o zachování energie

$$n_{pv} \cdot m_{pv} \cdot Q_{pv} + n_o \cdot m_o \cdot Q_o = n_{sp} \cdot m_{sp} \cdot Q_{sp} + Q_S \quad [kJ/mol]$$

je uvolněné teplo Q_S (kJ/ kg) z 1 kg paliva = v podstatě spalné teplo

4

Statika hoření

Základními údaji pro navrhování spalovacího zařízení i výhřevných ploch kotle jsou:

- spotřeba spalovacího vzduchu,
- množství vzniklých spalin.

Určují se

- ze stechiometrických spalovacích rovnic hořlavých složek paliva
- přibližně z empirických závislostí pomocí výhřevnosti

5

Model dokonalého spalování pevných a kapalných paliv

C	$+$	O_2	$\rightarrow$	CO_2	
1 kmol		1 kmol		1 kmol	+ 406 MJ
12,01 kg		22,39 Nm^3		22,27 Nm^3	
1 kg		$\frac{22,39}{12,01}$ Nm^3		$\frac{22,27}{12,01}$ Nm^3	+ 33,8MJ

6

$2\,H_2$	+ O_2	→ $2\,H_2O$	
2 kmoly	1 kmol	2 kmol	+ 572 MJ
4,032 kg	22,39 Nm^3	44,81 Nm^3	
1 kg	$\frac{22,39}{4,032}$ Nm^3	$\frac{44,81}{4,032}$ Nm^3	+ 142 MJ (+ 119,6 MJ)

S	+ O_2	→ SO_2	
1 kmol	1 kmol	1 kmol	+ 29,7 MJ
32,06 kg	22,39 Nm^3	21,89 Nm^3	
1 kg	$\frac{22,39}{32,06}$ Nm^3	$\frac{21,89}{32,06}$ Nm^3	+ 9,25 MJ

7

Stechiometrické výpočty

= objemové výpočty

- potřebného množství spalovacího vzduchu
- vzniklých spalin
- složení spalin

Dva základní modely spalování

- dokonalé spalování
- nedokonalé spalovaní

8

Potřeba spalovacího vzduchu pro tuhá/kapalná paliva

Min. objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{O_2\,\min} = 22{,}39 \cdot \left(\frac{C^r}{12{,}01} + \frac{H^r}{4{,}032} + \frac{S^r_{prch}}{32{,}06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

Min. objem suchého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 kg paliva

$$O_{VS\,\min} = \frac{O_{O_2\,\min}}{0{,}21} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

Min. objem vlhkého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 kg paliva

$$O_{VV\,\min} = \chi_v \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

$$\chi_v = 1{,}016$$

a objem vodní páry v tomto objemu

$$O^V_{H_2O} = O_{VV\,\min} - O_{VS\,\min} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

9

Součinitel χ_v [-] respektující zvětšení objemu vzduchu v důsledku vlhkosti

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [-]$$

kde φ [%] je relativní vlhkost vzduchu,

p'' [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu t_v,

p_c [MPa] je celkový tlak – obvykle 0,1 MPa

t_v [°C]	0	10	20	30	40	50
p'' [MPa]	0,000 610 8	0,001 227 7	0,002 336 8	0,004 241 6	0,007 374 2	0,012 331 6

obvyklá hodnota pro p_c = 0,101325 MPa, t_v = 20 °C, φ = 70 %

$$\chi_v = 1{,}016$$

10

Produkce spalin při dokonalém spalování tuhých/kap. paliv

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

$$O_{SS\,\min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = \frac{22{,}27}{12{,}01} \cdot C^r + 0{,}0003 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = \frac{21{,}89}{32{,}06} \cdot S^r \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem dusíku

$$O_{N_2} = \frac{22{,}4}{28{,}016} \cdot N^r + 0{,}7805 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem argonu

$$O_{Ar} = 0{,}0092 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

11

Objem vodní páry ve spalinách

$$O^S_{H_2O} = \frac{44{,}8}{4{,}032} \cdot H^r + \frac{22{,}4}{18{,}016} \cdot W^r + O^V_{H_2O} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

Minimální objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

$$O_{SV\,\min} = O_{SS\,\min} + O^S_{H_2O} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

Součinitel přebytku vzduchu

definice

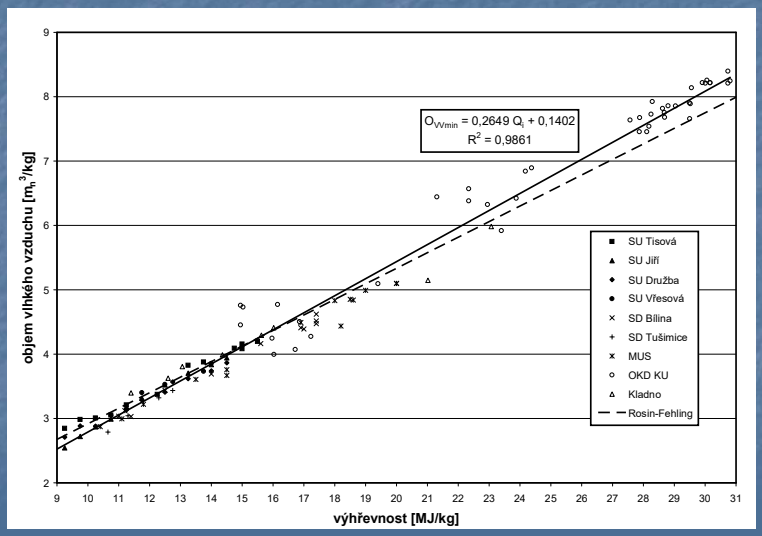
$$\alpha = \frac{O_{VV}}{O_{VV\,\min}} = \frac{O_{VS}}{O_{VS\,\min}} \quad [-]$$

Objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

$$O_{SV} = O_{SV\,\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

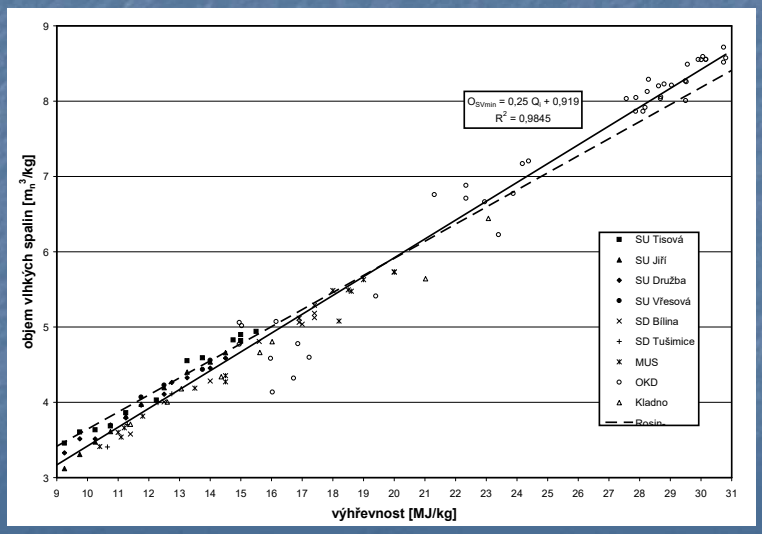
12

Přibližné určení spotřeby vzduchu



13

Přibližné určení množství spalin



14

$$O_{X\,\min} = a \cdot Q_i + b \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

$$O_{SS} = (0{,}2607 \cdot \alpha - 0{,}0074) \cdot Q_i + 0{,}138 \cdot \alpha + 0{,}0094$$
$$O_{SV} = (0{,}2649 \cdot \alpha - 0{,}0149) \cdot Q_i + 0{,}1402 \cdot \alpha + 0{,}7788 \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

	a [Nm³/MJ]	b [Nm³/kg]	spolehlivost R^2 [-]	průměrná chyba [%]
objem suchého vzduchu O_{VSmin}	0,2607	0,1380	0,9861	3,42
objem vlhkého vzduchu O_{VVmin}	0,2649	0,1402	0,9861	3,42
objem suchých spalin O_{SSmin}	0,2533	0,1474	0,9873	3,26
objem vlhkých spalin O_{SVmin}	0,2500	0,9190	0,9845	3,18

$$ppm_{SO_2} = \frac{6828 \cdot x_k \cdot S^r}{0{,}3576 \cdot Q_i + 0{,}2026} \quad \text{resp.} \quad mg_{SO_2} = \frac{19981 \cdot x_k \cdot S^r}{0{,}3576 \cdot Q_i + 0{,}2026}$$

platí i pro dřevo do $W^r = 35$ %

15

Stechiometrické výpočty pro plynná paliva

- složení plynných paliv se udává výčtem objemových podílů jednotlivých plynných složek
- jednotkovým množstvím plynných paliv je 1 Nm³
- základní hořlavou složkou zemního plynu je metan CH_4 a další uhlovodíky – obecně definované jako C_mH_n

16

Potřeba spalovacího vzduchu pro plynná paliva

Min. objem kyslíku potřebný pro dok. spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{O_2\,\min} = 0{,}5 \cdot o_{H_2} + 0{,}5 \cdot o_{CO} + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot o_{C_mH_n} - o_{O_2} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

Min. objem suchého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{VS\,\min} = \frac{O_{O_2\,\min}}{0{,}21} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

Min. objem vlhkého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{VV\,\min} = \chi_v \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

$$\chi_v = 1{,}016$$

a objem vodní páry v tomto objemu

$$O^V_{H_2O} = O_{VV\,\min} - O_{VS\,\min} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

17

Produkce spalin při dokonalém spalování plynných paliv

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{SS\,\min} = O_{CO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{SO_2} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0{,}994 \cdot \left(o_{CO} + \sum m \cdot o_{C_mH_n}\right) + 0{,}0003 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

objem oxidu siřičitého $O_{SO_2} = o_{SO_2} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$

objem dusíku $O_{N_2} = o_{N_2} + 0{,}7805 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$

objem argonu $O_{Ar} = o_{Ar} + 0{,}0092 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$

18

Objem vodní páry ve spalinách

$$O^{S}_{H_2O} = o_{H_2O} + o_{H_2} + \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_mH_n} + O^{V}_{H_2O} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

Minimální objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{SV\,\min} = O_{SS\,\min} + O^{S}_{H_2O} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

Součinitel přebytku vzduchu

definice: $$\alpha = \frac{O_{VV}}{O_{VV\,\min}} = \frac{O_{VS}}{O_{VS\,\min}} \quad [-]$$

Objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 Nm^3 paliva

$$O_{SV} = O_{SV\,\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/Nm^3}]$$

19

Tepelný obsah vzduchu a spalin

- je důležitý pro řešení energetických bilancí
- tepelný příkon v palivu

$$Q_{pv} = M_{pv}.Q_i \quad resp. \quad = V_{pl}.Q_i \quad [\mathrm{kW}]$$

- tepelný příkon ve spalovacím vzduchu

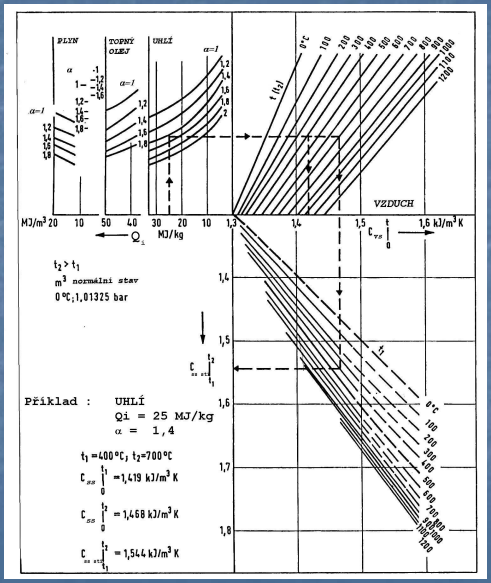
$$Q_v = M_{pv}.O_{VV}.c_V.t_V \quad resp. \quad = V_{pl}.O_{VV}.c_V.t_V \quad [\mathrm{kW}]$$

- tepelný výkon ve spalinách

$$Q_s = M_{pv}.O_{SV}.c_S.t_S \quad resp. \quad = V_{pl}.O_{SV}.c_S.t_S \quad [\mathrm{kW}]$$

20

Měrná tepelná kapacita vzduchu a spalin



21

Entalpie vzduchu a spalin

$$H_S^{t,\alpha} = H_{S\,\min}^t + (\alpha - 1)\cdot H_{V\,\min}^t \quad \text{[kJ/kg] resp. [kJ/Nm}^3\text{]}$$

$$H_{S\min}^t = O_{CO_2}\cdot h_{CO_2}^t + O_{SO_2}\cdot h_{SO_2}^t + O_{N_2}\cdot h_{N_2}^t + O_{Ar}\cdot h_{Ar}^t + O_{H_2O}\cdot h_{H_2O}^t + a_{ú}\cdot A^r\cdot h_{pop}^t \quad \text{[kJ/kg]resp. [kJ/Nm}^3\text{]}$$

$$H_{V\,\min}^t = O_{VS\,\min}\cdot h_{VS}^t + O_{H_2O}^v\cdot h_{H_2O}^t \quad \text{[kJ/kg] resp. [kJ/Nm}^3\text{]}$$

- tepelný příkon ve spalovacím vzduchu

$$Q_v = M_{pv}\cdot\alpha\cdot H_{V\,\min}^t \quad resp. \quad = V_{pl}\cdot\alpha\cdot H_{V\,\min}^t \quad \text{[kW]}$$

- tepelný výkon ve spalinách

$$Q_s = M_{pv}\cdot H_S^{t,\alpha} \quad resp. \quad = V_{pl}\cdot H_S^{t,\alpha} \quad \text{[kW]}$$

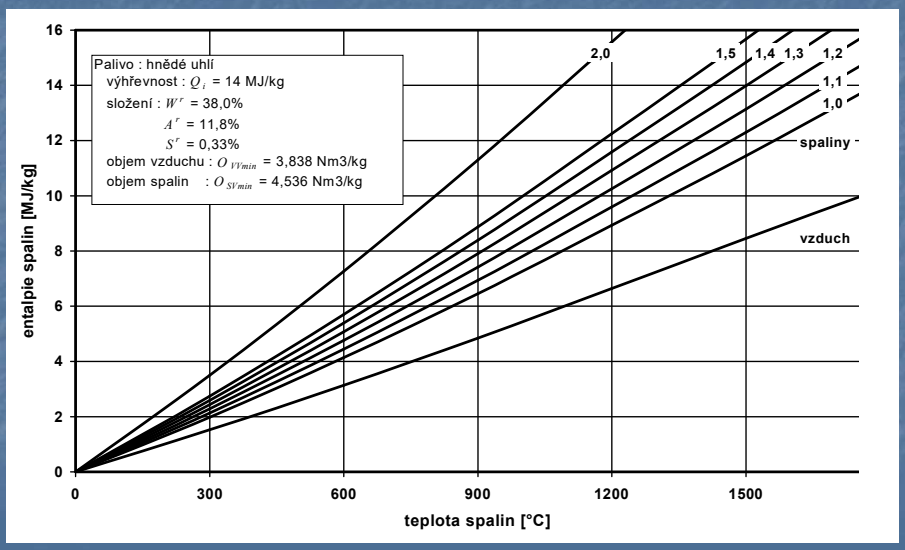
22

Měrná entalpie složek spalin *h* (kJ/Nm^3)

t [°C]	CO_2	SO_2	N_2	*Ar*	H_2O	vzduch suchý	*CO*	O_2	popílek [kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,10	32,57	32,49	32,78	20,20
100	170,0	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395,0	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664,0	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381
2000	4844	4890	2965	1857	3925	3065	3008	3138	2500
2500	6204	6205	3778	2321	5132	3909	3830	4006	-

23

H - *t* diagram vzduchu a spalin



24

Průtok vzduchu a spalin

$$V_V = M_{pv} \cdot \alpha \cdot O_{VV\,\min} \cdot \frac{273 + \bar{t}_v}{273} \cdot \frac{0{,}101325}{p_b + \Delta p_v} \quad [\mathrm{m^3/s}]$$

$$V_S = M_{pv} \cdot \left[O_{SV\,\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\,\min}\right] \cdot \frac{273 + \bar{t}_S}{273} \cdot \frac{0{,}101325}{p_b + \Delta p_S} \quad [\mathrm{m^3/s}]$$

Pro získání skutečných průtoků je nutno provést korekciobjemů v Nm^3 na skutečnou teplotu a tlak podle stavové rovnice

25

Nedokonalé spalování

- palivo v kotli nikdy nevyhoří dokonale
- nedokonalost spalování je příčinou ztrát
  - hořlavinou ve spalinách
  - hořlavinou v tuhých zbytcích
- nedokonalost spalování tuhých a kapalných paliv se obvykle vztahuje pouze k nedokonalému vyhoření uhlíku
  - podíl *a* [kg/kg] uhlíku shoří nedokonale na CO
  - podíl *b* [kg/kg] uhlíku neshoří vůbec

26

Spalování uhlíku C na CO

C	+	1/2 O_2	→	CO	
1 kmol		1/2 kmol		1 kmol	+ 124 MJ
12,01 kg		22,39 / 2 Nm^3		22,40 Nm^3	
1 kg		$\frac{22,39}{2 \cdot 12,01}$ Nm^3		$\frac{22,40}{12,01}$ Nm^3	+ 10,3 MJ

27

Části uhlíku *a* a *b*

Části uhlíku *a* a *b* je možné vyjádřit
ze ztráty chemickým a mechanickým nedopalem

$$a = \frac{Z_{co} \cdot Q_i}{(33828,5 - 10334) \cdot C^r} \qquad b = \frac{Z_c \cdot Q_i}{33828,5 \cdot C^r} \text{ [-]}$$

kde

Z_{co} a Z_c [-] je ztráta chemickým a mechanickým nedopalem,
Q_i [kJ/kg] je výhřevnost paliva,
C^r [-] je podíl uhlíku v původním palivu a
konstanty 33828,5 a 10334 kJ/kg jsou reakční tepla 1 kg uhlíku na CO_2 a CO

28

Vliv nedokonalosti na složení a objem spalin

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22{,}26}{12{,}01} \cdot C^r + 0{,}0003 \cdot O_{VS\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem oxidu uhelnatého

$$O_{CO}^N = a \cdot \frac{22{,}4}{12{,}01} \cdot C^r \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

objem kyslíku

$$O_{O_2}^N = \left(\frac{a}{2} + b\right) \cdot \frac{22{,}39}{12{,}01} \cdot C^r \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

minimální objem suchých spalin při nedokonalém spalování pak je

$$O_{SS\,\min}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

minimální objem vlhkých spalin je dán vztahem

$$O_{SV\,\min}^N = O_{SS\,\min}^N + O_{H_2O}^S \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

a objem spalin z 1 kg paliva při nedokonalém spalování s přebytkem vzduchu $\alpha > 1$ bude

$$O_{SV}^N = O_{SV\,\min}^N + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\,\min} \quad [\mathrm{Nm^3/kg}]$$

29

Kontrola jakosti spalování

- jakost spalování nemá specifický ukazatel
- hodnotí se nepřímo pomocí
  - ztráty hořlavinou ve spalinách
  - ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích
  - přebytku spalovacího vzduchu
- pro jejich vyhodnocení je třeba určit
  - obsah kyslíku a CO ve spalinách
  - podíl nespálených látek v tuhých zbytcích

30

Metodika kontroly spalování

Je třeba provést :

- chemickou analýzu spalin s cílem určit obsah O_2 a CO (případně i dalších emisních látek) – provádí se speciálními analyzátory spalin
- chemický rozbor tuhých zbytků po spalování (škvára, úlet) s cílem určit podíl spalitelných látek – provádí se rozborem odebraných vzorků tuhých zbytků ve specializovaných laboratořích

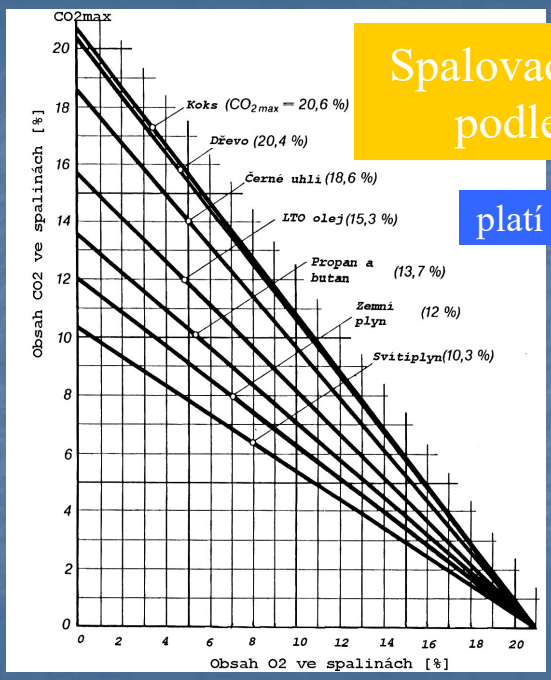
31

Základní pravidla

Pro suché spaliny konkrétního paliva platí :

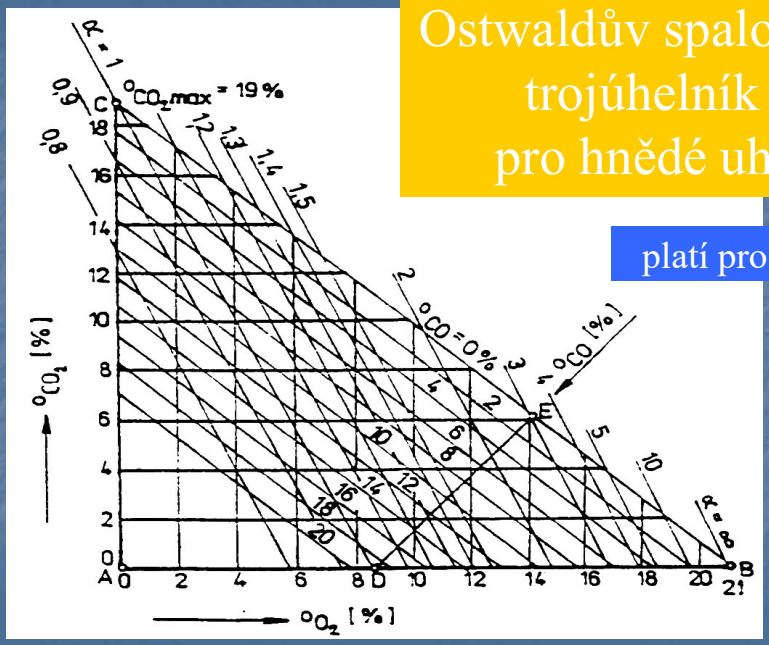
- při dokonalém spalování musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah CO_2 s obsahem O_2 (resp. přebytkem vzduchu α).
- při nedokonalém spalování plynu musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah CO_2, CO a obsah O_2 (resp. přebytek vzduchu α)
- při nedokonalém spalování tuhých a kalných paliv musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah CO_2, CO, O_2 (resp. přebytek vzduchu α) a obsah nespáleného uhlíku v TZ

32



Spalovací trojúhelník podle Bunteho

platí pro a,b = 0



Ostwaldův spalovací trojúhelník pro hnědé uhlí

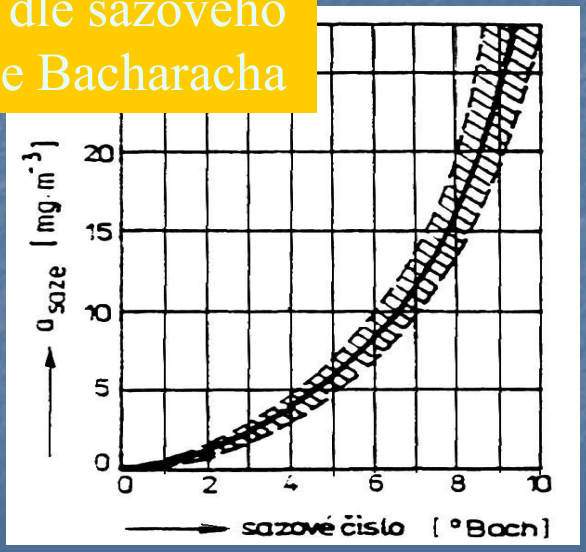
platí pro b = 0

Kontrola jakosti spalování

- V minulosti se Ostwaldův a Bunteův spalovací trojúhelník používaly ke kontrole spalovacího procesu.
- Dnes slouží
  - jako názorná pomůcka pro vysvětlení pevnou závislost mezi složkami suchých spalin CO, CO_2 a O_2
  - pro kontrolu běžně používané měřicí techniky

35

Koncentrace sazí ve spalinách dle sazového čísla podle Bacharacha



36

Určení součinitele přebytku vzduchu

Za provozu kotle lze součinitel přebytku vzduchu určit

- pro dokonalé spalování z objemové koncentrace kyslíku v suchých spalinách ze vztahu

$$\alpha = \frac{0{,}21 + \left(\frac{O_{SS\,\min}}{O_{VS\,\min}} - 1 \right) \cdot o_{O_2}}{0{,}21 - o_{O_2}} \approx \alpha = \frac{0{,}21}{0{,}21 - o_{O_2}}$$

- pro nedokonalé spalování pomocí numericko-početní metody prof. Jirouše zahrnuté do dříve platné normy ČSN 07 0302 Přejímací zkoušky parních kotlů

37