

## Spalování paliv

Spalování je fyzikálně – chemický pochod, při kterém probíhá

- řízená příprava hořlavé směsi paliva a okysličovadla
- jejich slučování (hořením) za intenzivního uvolňování tepla => prudké stoupnutí teploty
- vznik spalin jakožto produktu spalování

1

## Hoření

je možné pouze mezi elementárními složkami v atomárním stavu

- hořlaviny (C, H, S)
- okysličovadla (nejčastěji O<sub>2</sub> ze vzduchu).

Pracovními látkami spalovacích procesů jsou

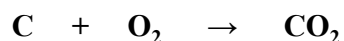
- palivo
- okysličovadlo
- spaliny - jsou produktem spalování a nositelem uvolněného chemicky vázaného tepla

Spaliny

- plynné = směs převážně nehořlavých plynů (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>+SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>) a par (H<sub>2</sub>O)
- pevné spaliny z popelovin (škvára, struska, popílek)

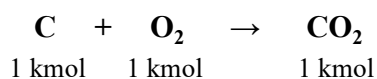
2

## Model dokonalého spalování tuhých a kapalných paliv



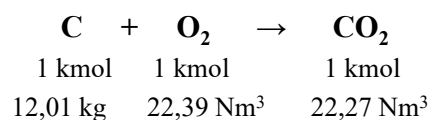
3

## Model dokonalého spalování tuhých a kapalných paliv



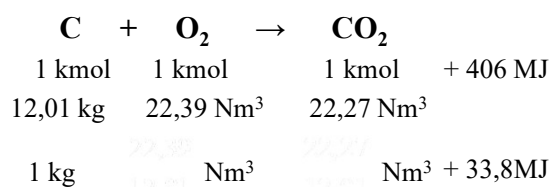
4

## Model dokonalého spalování tuhých a kapalných paliv

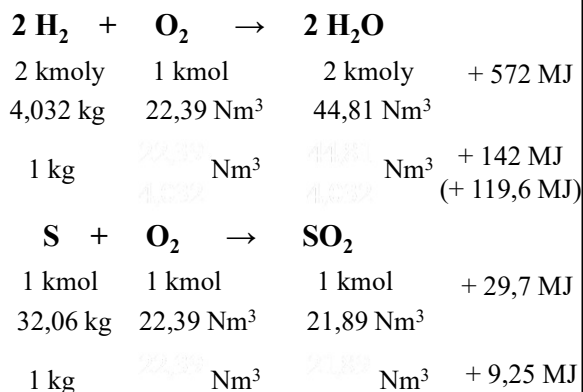


5

## Model dokonalého spalování tuhých a kapalných paliv



6



7

## Stechiometrické výpočty

= objemové výpočty

- potřebného množství spalovacího vzduchu
- objem vzniklých spalin
- objemové složení vzniklých spalin

Dva základní modely spalování

- dokonalé spalování
- nedokonalé spalování

8

### Potřeba spalovacího vzduchu pro tuhá/kapalná paliva

Min. objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

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

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

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

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

$$O_{VV, \min} = \chi_v \cdot O_{VS, \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad \chi_v = 1,016$$

a objem vodní páry v tomto objemu

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

9

Součinitel  $\chi_v$  [-] 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  $\varphi$  [%] 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,  $\varphi = 70$  %

$$\chi_v = 1,016$$

10

### Produkce spalin při dokonalém spalování tuhých/kap. paliv

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

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

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS, \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

objem oxidu siřičitého

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

objem dusíku

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

objem argonu

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

11

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Minimální objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

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

Součinitel přebytku vzduchu

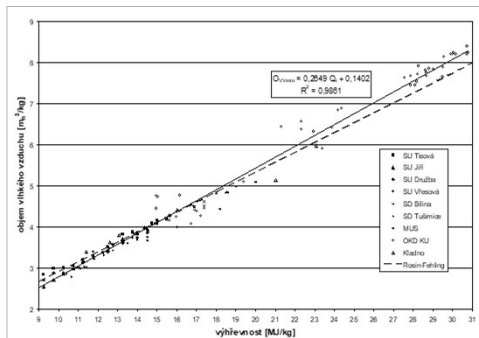
$$\text{definice} \quad \alpha = \frac{O_{VV}}{O_{VV, \min}} = \frac{O_{VS}}{O_{VS, \min}} \quad [-]$$

Objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

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

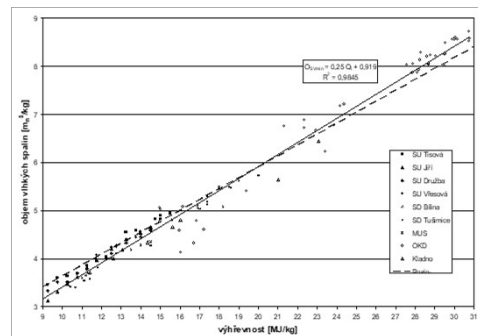
12

Přibližné určení spotřeby vzduchu



13

Přibližné určení množství spalin



14

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

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

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

	$a$ [Nm <sup>3</sup> /MJ]	$b$ [Nm <sup>3</sup> /kg]	spolehlivost $R^2$ [-]	průměrná chyba [%]
objem suchého vzduchu $O_{SS\min}$	0,2607	0,1380	0,9861	3,42
objem vlhkého vzduchu $O_{SV\min}$	0,2649	0,1402	0,9861	3,42
objem suchých spalin $O_{SS\min}$	0,2533	0,1474	0,9873	3,26
objem vlhkých spalin $O_{SV\min}$	0,2500	0,9190	0,9845	3,18

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

15

Stechiometrické výpočty pro plynná paliva

- složení plyných paliv se udává výčtem objemových podílů jednotlivých plyných složek
- jednotkovým množstvím plyných paliv je 1 Nm<sup>3</sup>
- základní hořlavou složkou zemního plynu je metan CH<sub>4</sub> a další uhlovodíky – obecně definované jako C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>

16

Potřeba spalovacího vzduchu pro plynná paliva

Min. objem kyslíku potřebný pro dok. spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

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

Min. objem suchého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

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

Min. objem vlhkého vzduchu potřebný pro dok. spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

$$O_{VV\min} = \chi_v \cdot O_{VS\min} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad \chi_v = 1,016$$

a objem vodní páry v tomto objemu

$$O_{H_2O}^V = O_{VV\min} - O_{VS\min} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS\min} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3]$$

17

Produkce spalin při dokonalém spalování plyných paliv

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

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

objem oxidu uhličitého

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

objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = o_{SO_2} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3]$$

objem dusíku

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

objem argonu

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

18

Objem vodní páry ve spalínách

$$O_{H_2O}^S = o_{H_2O} + o_{H_2} + \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_m H_n} + O_{H_2O}^V \quad [Nm^3/Nm^3]$$

Minimální objem vlhkých spalín při dokonalém spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

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

Součinitel přebytku vzduchu

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

Objem vlhkých spalín při dokonalém spálení 1 Nm<sup>3</sup> paliva

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

## Tepelný obsah vzduchu a spalín

- tepelný příkon v palivu

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

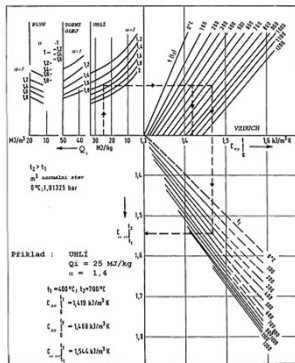
- tepelný příkon ve spalovacím vzduchu

$$Q_v = M_{pv} \cdot O_{VV} \cdot c_v \cdot t_v \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot O_{VV} \cdot c_v \cdot t_v \quad [kW]$$

- tepelný výkon ve spalínách

$$Q_s = M_{pv} \cdot O_{SV} \cdot c_s \cdot t_s \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot O_{SV} \cdot c_s \cdot t_s \quad [kW]$$

## Měrná tepelná kapacita vzduchu a spalín



## Entalpie vzduchu a spalín

$$I_S^{\alpha} = I_{S\ min}^{\alpha} + (\alpha - 1) \cdot I_V^{\alpha} \quad [kJ/kg] \text{ resp. } [kJ/Nm^3]$$

$$I_{S\ min}^{\alpha} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^{\alpha} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^{\alpha} + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^{\alpha} + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^{\alpha} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^{\alpha} + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^{\alpha} \quad [kJ/kg] \text{ resp. } [kJ/Nm^3]$$

$$I_V^{\alpha} = O_{VS\ min} \cdot i_{VS}^{\alpha} + O_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O}^{\alpha} \quad [kJ/kg] \text{ resp. } [kJ/Nm^3]$$

- tepelný příkon ve spalovacím vzduchu

$$Q_v = M_{pv} \cdot \alpha \cdot I_V^{\alpha} \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot \alpha \cdot I_V^{\alpha} \quad [kW]$$

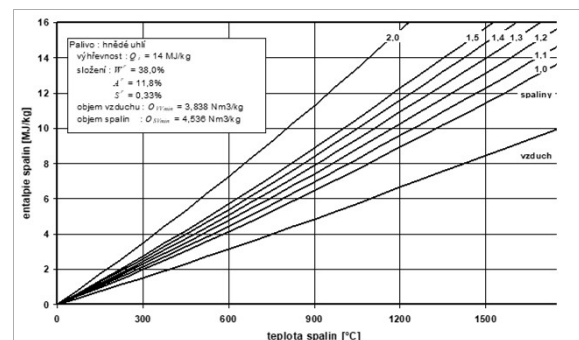
- tepelný výkon ve spalínách

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

## Měrná entalpie složek spalín

t [°C]	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O	vzduch suchý	CO	O <sub>2</sub>	přípisek [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	-

## I-t diagram vzduchu a spalín



## Skutečný průtok vzduchu a spalin

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

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{ST \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{TV \min}] \cdot \frac{273 + \bar{t}_s}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_b + \Delta p_s} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Pro získání skutečných průtoků je nutno provést korekci objemů v Nm<sup>3</sup> na skutečnou teplotu a tlak podle stavové rovnice