

## 1. Spalování paliv

Spalování je fyzikálně-chemický pochod, při kterém probíhá řízená příprava hořlavé směsi paliva a okysličovadla a jejich slučováním (hořením) za intenzivního uvolňování tepla, což způsobuje prudké stoupnutí teploty směsi a vzniklých spalin (produktu spalování). Hoření může začít samovolně, tzn. samovznícením, nebo působením vnějšího tepelného impulzu, tzn. iniciátorem zápalu. Má charakter řetězového děje, při kterém část spalného tepla slouží jako iniciátor zapálení nově vstupující hořlavé směsi do reakce. Spalování může probíhat až do vyčerpání zásoby hořlavé směsi nebo jedné její složky (paliva nebo okysličovadla), resp. do okamžiku, kdy se intenzivním odvodem tepla přeruší řetězová reakce tím, že teplota hořlavé směsi klesne pod zápalnou teplotu.

Hoření je možné pouze mezi elementárními složkami hořlaviny (C, H, S) a to v atomárním stavu, a okysličovadla (nejčastěji O<sub>2</sub> ze vzduchu). Pracovními látkami spalovacích procesů jsou **palivo**, **okysličovadlo** a **spaliny**. Z technického hlediska lze za **palivo** pokládat každou látku přirozeného nebo umělého původu, která buď obsahuje nebo může uvolňovat elementární hořlavé prvky v atomárním stavu a která se dá poměrně snadno k hoření aktivizovat a která při spalování vyvíjí dostatečně velké teplo z hmotnostní nebo objemové jednotky, tzn. má dostatečně velké spalné teplo resp. výhřevnost. **Okysličovadlem** by teoreticky mohla být každá látka, která obsahuje nebo může uvolňovat atomární kyslík. Pro průmyslová a energetická ohniště se převážně používá atmosférický vzduch se 21 % objemovými, resp. 23 % hmotnostními kyslíku. Ve specifických případech se používá přímo kyslík nebo spaliny s vysokým podílem kyslíku (12 až 15 %). **Spaliny** jsou produktem spalování a nositelem uvolněného chemicky vázaného tepla a jsou směsí 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), avšak mohou obsahovat i plyny hořlavé (CO, H<sub>2</sub>, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>), pevnou fází (saze, popílek) a případně i fází kapalnou (kapičky kapalného paliva, dehet, vodní kapičky). Pevné spaliny (škvára, struska, popílek) vznikají z popelovin v palivech.

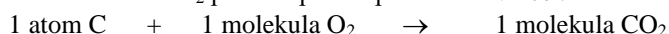
Mechanismus spalování je podrobně popsán a objasněn pouze u elementárních paliv a okysličovadel, protože u komplexního paliva a okysličovadla se jedná o řadu fyzikálních a chemických dějů, které probíhají částečně paralelně a částečně rychle za sebou a vzájemně se ovlivňují. Při přípravě paliva k zapálení a vlastnímu hoření dochází nejprve k přenosu tepla a hmoty spojených s ohřevem paliva, odpařením vody, odplynění prchavé hořlaviny, popř. u kapalných paliv s odpařováním paliva. Dalším ohřevem se pak na čele vznícování štěpí molekuly hořlaviny na atomy a vznikají radikály, které pak s oxidačním činidlem tvoří nejprve přechodné a pak trvalé sloučeniny za vývinu a částečné spotřeby tepla (disociace, rozklad některých složek popelovin apod.). Problematikou závislosti hoření na stavových podmínkách (teplota, tlak, koncentrace) a otázkami difúze okysličovadla k hořlavině se zabývá dynamika spalování. Statika spalování je stechiometrie spalování, tzn. určování slučovacích poměrů při spalování. Na základě sumárních spalovacích rovnic hořlavých komponent paliva se určuje spotřeba okysličovadla pro spálení hmotnostní (objemové) jednotky paliva a množství spalin vzniklých spálením jednotky paliva.

### 1.1. Sumární spalovací rovnice dokonalého spalování

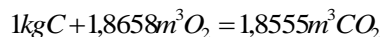
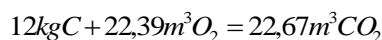
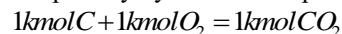
#### 1.1.1. Pevná a kapalná paliva

Pevná a kapalná paliva obsahují uhlík, vodík a síru, které se mohou slučovat s kyslíkem při tzv. stechiometrických poměrech (bez přebytku okysličovadla).

Spalování uhlíku C na CO<sub>2</sub> probíhá podle spalovací rovnice :



Molekulární poměry výše uvedené spalovací rovnice lze zapsat následovně :

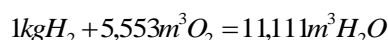
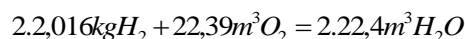
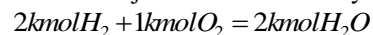


a výsledek znamená, že pro dokonalé spálení 1 kg uhlíku potřebujeme 2,67 kg kyslíku a vznikne 3,67 kg oxidu uhličitého. Obdobně lze vztah zapsat s použitím objemového vyjádření plynných komponent.

Spalování vodíku popisuje sumární spalovací rovnice :



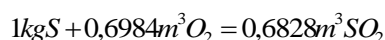
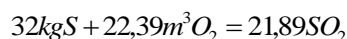
která vede k následujícím stechiometrickým vztahům:



Spalování síry popisuje sumární spalovací rovnice :



která vede k následujícím stechiometrickým vztahům pro hmotnostní a objemové vyjádření:



### 1.1.2. Plynná paliva

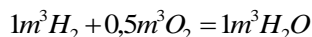
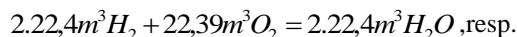
U plynných paliv se postupuje při stanovení stechiometrických poměrů obdobně, ze sumárních spalovacích rovnic hořlavých plynů, ale obvykle se používá vyjádření objemové a nikoliv hmotnostní.

Pro spalování vodíku platí stejná spalovací rovnice jako u pevných paliv :

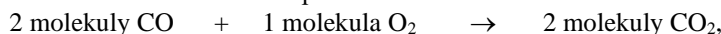


která vede k následujícím stechiometrickým vztahům :

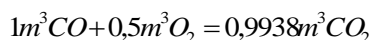
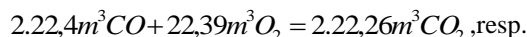
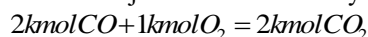
objemové vyjádření



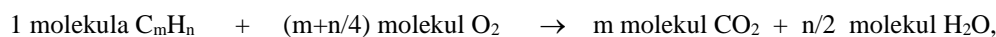
Pro spalování oxidu uhelnatého CO platí slučovací rovnice



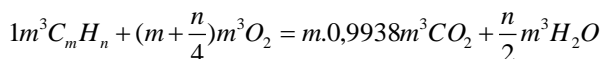
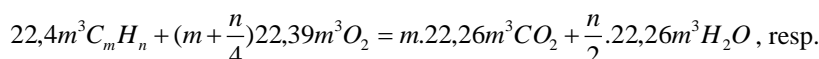
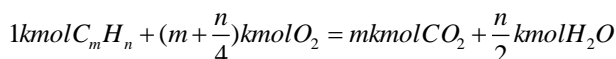
která vede k následujícím stechiometrickým vztahům



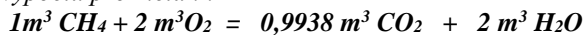
Pro spalování všech uhlovodíků  $C_mH_n$  ( $m$  = počet atomů uhlíku a  $n$ =počet atomů vodíku v molekule) platí slučovací rovnice



která vede k následujícím stechiometrickým vztahům



Příklad výpočtu pro metan :



Všechny **objemy** vypočtené ze stechiometrických rovnic jsou uváděny v tzv. **normálním stavu**, tj. při teplotě 273,1 K (0°C) a tlaku 101,325 kPa.

## 1.2. Stechiometrické výpočty pro dokonalé spalování

Cílem stechiometrických výpočtů je zjištění objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva, objemu a složení spalin, které při spalování vznikají, jsou to tedy výpočty objemové. Vychází se při tom z chemických reakčních rovnic, kterým se pak říká stechiometrické spalovací rovnice (viz výše), a bilance látkových množství. Z hlediska průběhu spalování rozlišujeme dva základní modely :

- model dokonalého spalování
- model nedokonalého spalování

Oba tyto modely nejdou do podstaty průběhu spalování, bilancují pouze vstupní a konečný stav. Model dokonalého spalování předpokládá dokonalé spálení veškeré hořlaviny obsažené v palivu, jedná se tedy o čistě teoretický případ. Model nedokonalého spalování připouští pouze částečné vyhoření paliva a vznik nedopalu

- mechanického ve formě nespáleného tuhého uhlíku  $C$  a
- chemického ve formě nedokonalého spalování uhlíku na  $CO$ .

Oba nedopaly jsou pak zohledněny příslušnými ztrátami kotle

- ztrátou mechanickým nedopalem  $Z_C$  a
- ztrátou chemickým nedopalem  $Z_{CO}$ .

Přestože druhý model se blíží více reálným podmínkám při spalování, v převážné většině technických aplikací postačí pracovat s jednodušším modelem dokonalého spalování.

### 1.2.1. Výpočet pro tuhá a kapalná paliva

Při stechiometrickém výpočtu se vychází ze složení paliva v hmotnostních podílech pro původní stav. Vypočtené objemy médií jsou označovány jako minimální a obvykle se vyjadřují v  $Nm^3$  (normálních metrech krychlových pro  $T_n = 273 \text{ K}$ ,  $p_n = 101,325 \text{ kPa}$ ) na 1 kg spáleného paliva pro suchý a vlhký stav. Při tom se předpokládá, že kyslík vázaný v hořlavině paliva se při spalování uvolní a zapojí se do hoření, takže o toto množství je možné snížit přívod vzdušného kyslíku.

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva se určí ze vztahu

$$O_{O_2, \min} = 22,39 \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad [Nm^3/kg] \quad (1.1)$$

kde  $S_{prch}^r$  [-] je hmotnostní podíl prchavé složky síry v původním stavu, který je schopný oxidace. V případě uhlí se jedná o síru organickou a pyritickou. Síra vázaná v síranech, se při spalování neoxiduje. S ohledem na to, že prchavé složky síry jsou v českých uhlích zastoupeny cca 95%, je možné bez vážnější chyby použít při výpočtu celkový obsah síry v palivu  $S^r$ .

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva vychází z objemového podílu kyslíku v suchém vzduchu daném v tab. 1-1

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.2)$$

**tab. 1-1 Objemové složení suchého vzduchu**

Složka	Objemový podíl [-]
kyslík $O_2$	0,2100
dusík $N_2$	0,7805
Argon $Ar$ (včetně vzácných plynů)	0,0092
Oxid uhličitý $CO_2$	0,0003

Podíl vodní páry připadající na 1  $\text{Nm}^3$  suchého vzduchu se obvykle respektuje součinitelem  $\chi_v$  [-], který je možno určit ze vztahu

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [-] \quad (1.3)$$

kde  $\varphi$  [%] je relativní vlhkost vzduchu,  $p''$  [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu  $t_v$ , který je možno určit z tab. 4-3, a  $p_c$  [MPa] je celkový tlak, který obvykle bývá 0,1 MPa.

**tab. 1-2 Závislost parciálního tlaku vodní páry na teplotě vzduchu**

$t_v$ [°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

Při konstrukčních výpočtech pro běžné klimatické podmínky je možno volit velikost  $\chi_v = 1,016$  odpovídající přibližně relativní vlhkosti  $\varphi = 70\%$  při teplotě  $t_v = 20^\circ\text{C}$ .

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva je pak dán vztahem

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.4)$$

a objem vodní páry v tomto objemu

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.5)$$

V praxi se spalování provádí s větším množstvím vzduchu než vychází podle vztahu ( 1.4 ), neboť spalování s minimálním vzduchem by vedlo k vysokým nedopalům paliva. Minimální objem spalovacího vzduchu je tedy hodnota čistě teoretická. Lze ji užít k relativnímu vyjádření skutečného množství spalovacího vzduchu  $O_{VV}$  [ $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ] prostřednictvím **součinitele přebytku spalovacího vzduchu**  $\alpha$  [-]

$$\alpha = \frac{O_{VV}}{O_{VVmin}} = \frac{O_{VS}}{O_{VSmin}} \quad [-] \quad (1.6)$$

Minimální objem spalin dostaneme při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu  $O_{VVmin}$  (tj. při  $\alpha = 1$ ). Objem suchých spalin je dán součtem plynných složek, které při spalování vznikají nebo do spalin přecházejí ze spalovacího vzduchu, bez uvažování vlhkosti

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.7)$$

Objemy jednotlivých složek jsou určeny následujícími vztahy:

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.8)$$

objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.9)$$

objem dusíku

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.10)$$

a objem argonu, který zahrnuje i další vzácné plyny ze vzduchu

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.11)$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin je tvořen vodní parou ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí paliva a vlhkostí vzduchu

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.12)$$

Pokud se používá pára pro parní rozprašování oleje v hořácích nebo pro ofukování stěn spalovací komory v množství  $g_p$  [kg/kg], připočte se ještě hodnota  $1,24 \cdot g_p$ .

Minimální objem vlhkých spalin je pak dán součtovým vztahem

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2O}^S \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.13)$$

Objem spalin z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu  $\alpha > 1$  pak bude

$$O_{SV} = O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.14)$$

Všechny vyjádřené objemy platí pro normální stav, neodpovídají tedy skutečnému objemu za reálných podmínek. Pro zjištění skutečného objemu vzduchu nebo spalin je nutné provést přepočty podle stavové rovnice (s dostatečnou přesností stačí použít stavovou rovnici ideálního plynu), takže například skutečný objem spalin podle vztahu (1.14) při teplotě  $t_S$  [°C] a tlaku  $p_S$  [MPa] bude

$$O_{SV}^{t_S, p_S} = O_{SV} \cdot \frac{273 + t_S}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_S} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (1.15)$$

Korekci objemu na tlak je možné u většiny atmosférických spalovacích procesů zanedbat, korekce na teplotu má však zcela zásadní význam.

### 1.2.2. Výpočet pro plynná paliva

Při zadání plynu v objemových koncentracích odpadá při stechiometrických výpočtech práce s molárními hmotnostmi složek a příslušné objemy je možné vyjadřovat pouze podílem molárních množství ve stechiometrických rovnicích nebo přesněji podílem reálných molárních objemů. Tímto způsobem lze dospět k následujícím vyjádřením pro dokonalé spalování.

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm<sup>3</sup> plynu

$$O_{O_2, min} = 0,5 \cdot o_{H_2} + 0,5 \cdot o_{CO} + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot o_{C_m H_n} - o_{O_2} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.16)$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm<sup>3</sup> plynu

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2, min}}{0,21} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.17)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm<sup>3</sup> plynu

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.18)$$

a objem vodní páry v tomto objemu

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.19)$$

Dílčí objemy složek suchých spalin vzniklých při spalování plynu s přebytkem vzduchu  $\alpha = 1$  jsou objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0,994 \cdot (o_{CO} + \sum m \cdot o_{C_m H_n}) + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.20)$$

objem dusíku

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.21)$$

objem argonu

$$O_{Ar} = o_{Ar} + 0,0092 \cdot O_{VSmin} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.22)$$

objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = o_{SO_2} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.23)$$

Výsledný objem suchých spalin je dán jejich součtem

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{SO_2} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.24)$$

Objem vodní páry ve spalínách po stechiometrickém spalení plynu je

$$O_{H_2O}^S = o_{H_2O} + o_{H_2} + \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_nH_n} + O_{H_2O}^V \quad [Nm^3/Nm^3] \quad (1.25)$$

Minimální objem vlhkých spalín je pak dán součtovým vztahem

$$O_{SV\min} = O_{SS\min} + O_{H_2O}^S \quad [Nm^3/Nm^3] \quad (1.26)$$

Pro spalování s přebytkem vzduchu  $\alpha > 1$  platí obdobné vztahy jako u tuhých paliv.

**1.2.3. Tepelný obsah spalovacího vzduchu a spalín**

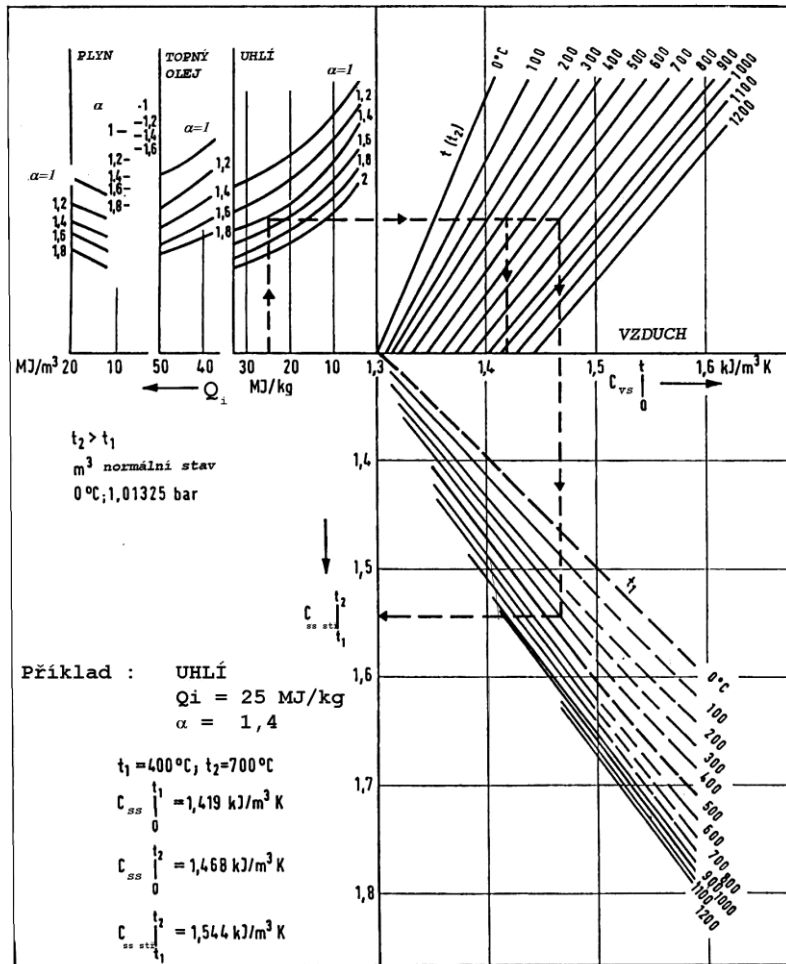
Přivádíme-li do ohniště  $M_{pv}$  [kg.s<sup>-1</sup>] nebo  $V_{pl}$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] paliva o výhřevnosti  $Q_i$ , pak palivem přivedeme tepelný výkon  $Q_{pv}$

$$Q_{pv} = M_{pv} \cdot Q_i \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot Q_i \quad [kW] \quad (1.27)$$

Přivedeme-li do ohniště pro spalení  $M_{pv}$  (resp.  $V_{pl}$ ) paliva spalovací vzduch o teplotě  $t_v$  [°C], pak ve spalovacím vzduchu přivedeme tepelný výkon  $Q_v$ :

$$Q_v = M_{pv} \cdot O_{VV} \cdot c_v \cdot t_v \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot O_{VV} \cdot c_v \cdot t_v \quad [kW] \quad (1.28)$$

kde je  $O_{VV} = \alpha \cdot O_{VV\min}$  objem vlhkého spalovacího vzduchu na jednotku paliva [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>, resp. m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>] a  $c_v$  [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>] měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě  $t_v$



**obr. 1-1 Diagram pro určení měrné tepelné kapacity vzduchu a spalín**

Tepelný výkon ve spalínách o teplotě  $t_s$  [°C] při součiniteli přebytku vzduchu  $\alpha$  pak je

$$Q_s = M_{pv} \cdot O_{SV} \cdot c_s \cdot t_s \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot O_{SV} \cdot c_s \cdot t_s \quad [kW] \quad (1.29)$$

kde je  $O_{SV}$  objem vlhkých spalín při přebytku vzduchu  $\alpha$  na jednotku paliva [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>, nebo m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>]

$O_{SV} = O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min}$  (platí pro dokonalé spalování),

$c_s$  [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita spalín při teplotě  $t_s$  a přebytku vzduchu  $\alpha$ .

Diagram pro přibližné určení měrné tepelné kapacity vzduchu a měrné tepelné kapacity spalín je uveden na obr. 1-1.

### 1.2.4. Entalpie vzduchu a spalin

Při přesnějších tepelných bilancích kotlů a spalinových výměníků je třeba vyjadřovat teplo, které je spalinám odebráno. K tomuto účelu je vhodnější využít entalpii spalin lépe než výše uvedenou měrnou tepelnou kapacitu. Pro zjednodušení bilančních vztahů je výhodnější nepracovat s měrnou entalpií spalin vztaženou na jednotku jejich objemu nebo hmotnosti, ale jako základní vztažnou jednotku brát objem spalin, který přísluší spálení jednotkového množství paliva. Jednotkou entalpie spalin je pak  $1 \text{ kJ/kg}_{\text{paliva}}$  resp.  $1 \text{ kJ/Nm}^3_{\text{plynu}}$ .

Jak již bylo vysvětleno, spaliny lze považovat za směs plynů, které mohou eventuálně obsahovat rozptýlené částice popílku. Jejich výslednou entalpii je proto možné vyjádřit jako součet entalpií dílčích složek včetně popílku. Objemy jednotlivých složek ve spalinách se získají stechiometrickým výpočtem, obsah popílku se zjistí z bilance popela v kotli. Pro běžnou praxi je proto postačující použít při vyjádření entalpie spalin objemy složek podle modelu dokonalého spalování.

Entalpii spalin o teplotě  $t$  [°C], které vzniknou po spálení  $1 \text{ kg}$  tuhého či kapalného paliva nebo  $1 \text{ Nm}^3$  plynu s přebytkem vzduchu  $\alpha$ , je dána vztahem

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t \quad [\text{kJ/kg}] \text{ resp. } [\text{kJ/Nm}^3] \quad (1.30)$$

V tomto vztahu představuje  $I_{S\min}^t$  entalpii stechiometrických spalin (pro  $\alpha = 1$ ) a  $I_{V\min}^t$  entalpii minimálního množství vzduchu při teplotě  $t$ , které se určí podle vztahů

$$I_{S\min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{ii} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t \quad [\text{kJ/kg}] \text{ resp. } [\text{kJ/Nm}^3] \quad (1.31)$$

$$I_{V\min}^t = O_{V\min} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t \quad [\text{kJ/kg}] \text{ resp. } [\text{kJ/Nm}^3] \quad (1.32)$$

V těchto výrazech představují  $i_i^t$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] měrné entalpie složek spalin při teplotě  $t$  [°C], které jsou uvedeny v tab. 1-3, a  $a_{ii}$  [-] představuje poměrný úlet popílku z ohniště vztažený k celkovému obsahu popela v palivu  $A^r$ .

Tepelný příkon ohniště ve spalovacím vzduchu o teplotě  $t_v$  [°C] se pomocí jeho entalpie vypočte podle vztahu

$$Q_v = M_{pv} \cdot \alpha \cdot I_{V\min}^t \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot \alpha \cdot I_{V\min}^t \quad [\text{kW}] \quad (1.33)$$

Tepelný výkon ve spalinách o teplotě  $t_s$  [°C] při součiniteli přebytku vzduchu  $\alpha$  pak je

$$Q_s = M_{pv} \cdot I_S^{t,\alpha} \quad \text{resp.} \quad = V_{pl} \cdot I_S^{t,\alpha} \quad [\text{kW}] \quad (1.34)$$

**tab. 1-3** Měrná entalpie některých složek spalin  $i_i^t$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] v závislosti na teplotě  $t$  [°C]

$t$ [°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	-

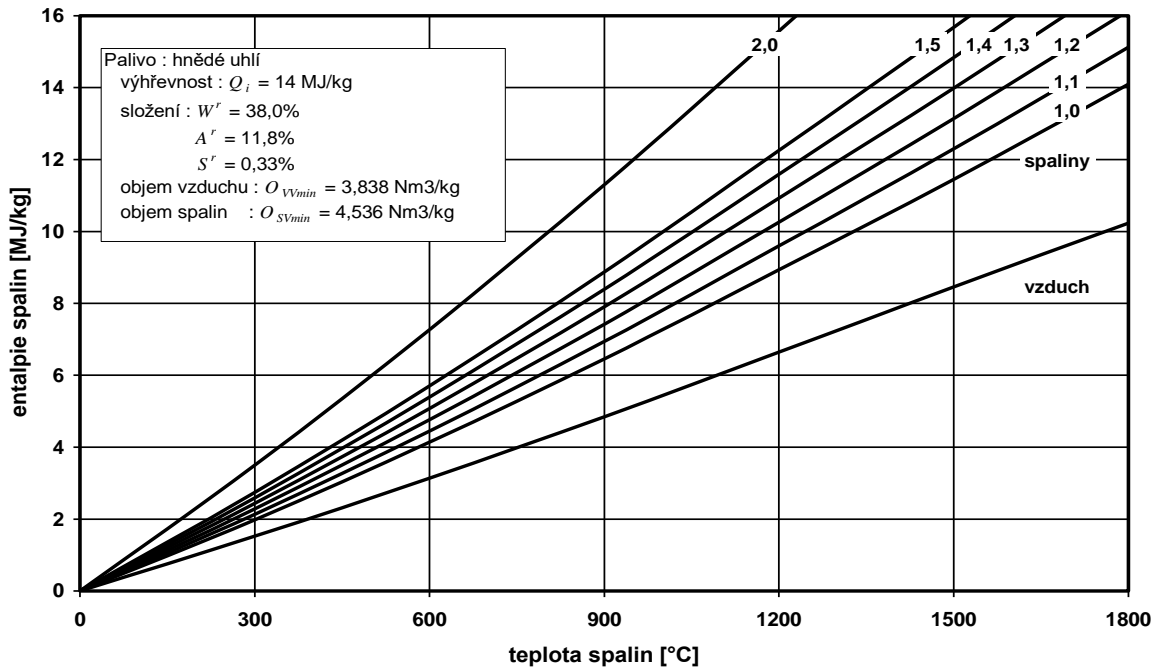
Podobně jako u stechiometrického výpočtu je i entalpie spalin svázána s konkrétním složením paliva a jakákoli jeho změna znamená i změnu jejich entalpie.

Pro zjednodušení práce při opakovaném bilancování výměníků v kotli se doporučuje sestavit I-t diagram spalin, který zachycuje graficky závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku spalovacího vzduchu a umožňuje snadný vzájemný převod těchto veličin. Diagram se konstruuje bod po bodu pro potřebný rozsah teplot (např. při návrhu celého kotle je to od 0 až do teploty nechlazeného plamene) a několik zvolených přebytků vzduchu, které se v kotli mohou vyskytnout. Vynesené body se prokládají hladkými křivkami. Příklad

I-t diagramu spalin je vidět na obr. 1-1. Velký rozsah teplot však zhoršuje přesnost odečtů, proto se někdy doporučuje sestavení tabulky (vzor viz. tab. 1-4), která umožní získat velmi přesné hodnoty na základě lineární interpolace mezi řádky a sloupci

tab. 1-4 Vzor záhlaví I-t tabulky spalin [°C]

$t$ [°C]	$I_{S\min}^t$ [kJ/kg]	$I_{V\min}^t$ [kJ/kg]	$I_S^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t$ [kJ/kg]					
			$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	



obr. 1-2 I-t diagram spalin pro hnědé uhlí

1.3. Průtok vzduchu a spalin

Stechiometrický výpočet objemů spalovacího vzduchu a vzniklých spalin pro jednotku spáleného paliva umožňuje velmi snadné vyjádření celkových průtoků pouhým přenásobením množství spáleného paliva  $M_{pv}$  [kg/s] resp. [Nm<sup>3</sup>/s]. Pro získání skutečných průtoků je nutno ještě provést korekci na skutečnou teplotu a tlak podle stavové rovnice. Průtok spalovacího vzduchu se pak vyjádří jako

$$V_V = M_{pv} \cdot \alpha \cdot O_{VV\min} \cdot \frac{273 + \bar{t}_v}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_b + \Delta p_v} \quad [m^3/s] \quad (1.35)$$

a průtok spalin

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min}] \cdot \frac{273 + \bar{t}_s}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_b + \Delta p_s} \quad [m^3/s] \quad (1.36)$$

kde  $\bar{t}$  [°C] je středí teplota,  $p_b$  [MPa] je barometrický tlak a  $\Delta p$  [MPa] je přetlak vůči okolí.