

1. Teoretické základy spalování

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 O₂ 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 (12 až 15 %). **Spaliny** jsou produktem spalování a nositelem uvolněného chemicky vázaného tepla a jsou směsí převážně nehořlavých plynů (N₂, CO₂, SO₂+SO₃, NO_x, O₂) a par (H₂O), avšak mohou obsahovat i plyny hořlavé (CO, H₂, C_mH_n), 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.

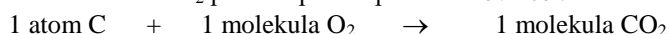
Mechanismus spalování je podrobně popsán a objasněn pouze u elementárních paliv a okysličovadel, protože u komplexního paliva a okysličovadla se jedná o řadu fyzikálních a chemických dějů, které probíhají částečně paralelně a částečně rychle za sebou a vzájemně se ovlivňují. Při přípravě paliva k zapálení 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

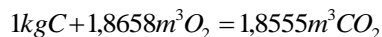
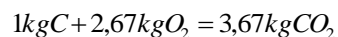
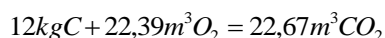
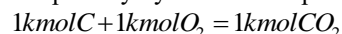
1.1.1. Pevná a kapalná paliva

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 CO₂ probíhá podle spalovací rovnice :



Molekulární poměry výše uvedené spalovací rovnice lze zapsat následovně :

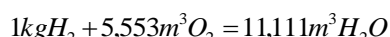
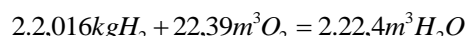
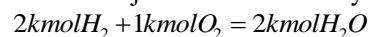


a výsledek znamená, že pro dokonalé spálení 1 kg uhlíku potřebujeme 2,67 kg kyslíku a vznikne 3,67 kg oxidu uhličitého. Obdobně lze vztah zapsat s použitím objemového vyjádření plynných komponent.

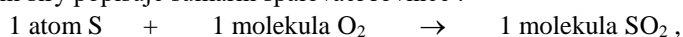
Spalování vodíku popisuje sumární spalovací rovnice :



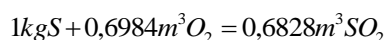
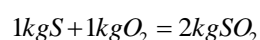
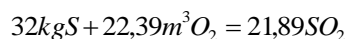
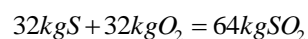
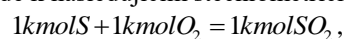
která vede k následujícím stechiometrickým vztahům:



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 :



kteřá vede k následujícím stechiometrickým vztahům :

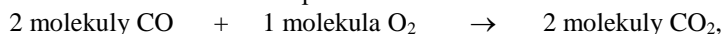
objemové vyjádření

$$2 \text{ kmol } H_2 + 1 \text{ kmol } O_2 = 2 \text{ kmol } H_2O$$

$$2,22,4 \text{ m}^3 H_2 + 22,39 \text{ m}^3 O_2 = 2,22,4 \text{ m}^3 H_2O, \text{ resp.}$$

$$1 \text{ m}^3 H_2 + 0,5 \text{ m}^3 O_2 = 1 \text{ m}^3 H_2O$$

Pro spalování oxidu uhelnatého CO platí slučovací rovnice



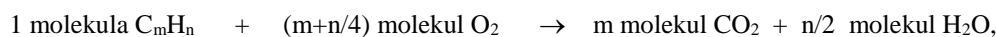
kteřá vede k následujícím stechiometrickým vztahům

$$2 \text{ kmol } CO + 1 \text{ kmol } O_2 = 2 \text{ kmol } CO_2$$

$$2,22,4 \text{ m}^3 CO + 22,39 \text{ m}^3 O_2 = 2,22,26 \text{ m}^3 CO_2, \text{ resp.}$$

$$1 \text{ m}^3 CO + 0,5 \text{ m}^3 O_2 = 0,9938 \text{ m}^3 CO_2$$

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



kteřá vede k následujícím stechiometrickým vztahům

$$1 \text{ kmol } C_mH_n + (m + \frac{n}{4}) \text{ kmol } O_2 = m \text{ kmol } CO_2 + \frac{n}{2} \text{ kmol } H_2O$$

$$22,4 \text{ m}^3 C_mH_n + (m + \frac{n}{4}) 22,39 \text{ m}^3 O_2 = m \cdot 22,26 \text{ m}^3 CO_2 + \frac{n}{2} \cdot 22,26 \text{ m}^3 H_2O, \text{ resp.}$$

$$1 \text{ m}^3 C_mH_n + (m + \frac{n}{4}) \text{ m}^3 O_2 = m \cdot 0,9938 \text{ m}^3 CO_2 + \frac{n}{2} \text{ m}^3 H_2O$$

Příklad výpočtu pro metan :

$$1 \text{ m}^3 CH_4 + 2 \text{ m}^3 O_2 = 0,9938 \text{ m}^3 CO_2 + 2 \text{ m}^3 H_2O$$

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 a objemu 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

$$O_{VS\min} = \frac{O_{O_2\min}}{0,21} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.2)$$

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 Nm^3 suchého vzduchu se obvykle respektuje součinitelem χ_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 φ [%] je relativní vlhkost vzduchu, p'' [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu t_v , který je možné 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

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

a objem vodní páry v tomto objemu

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

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} [Nm^3/kg] prostřednictvím **součinitele přebytku spalovacího vzduchu** α [-]

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

Minimální objem spalin dostaneme při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu $O_{VV\min}$ (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

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

Objemy jednotlivých složek jsou určeny následujícími vztahy:

objem oxidu uhličitého

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Nm³ 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 Nm³ plynu

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

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm³ plynu

$$O_{VV \min} = \chi_v \cdot O_{VS \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \quad (1.18)$$

a objem vodní páry v tomto objemu

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

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

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

objem dusíku

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

objem argonu

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

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

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

Objem vodní páry ve spalinách po stechiometrickém spálení plynu je

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

Minimální objem vlhkých spalín je pak dán součtovým vztahem

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

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

1.2.3. Tepelný obsah spalovacího vzduchu a spalín

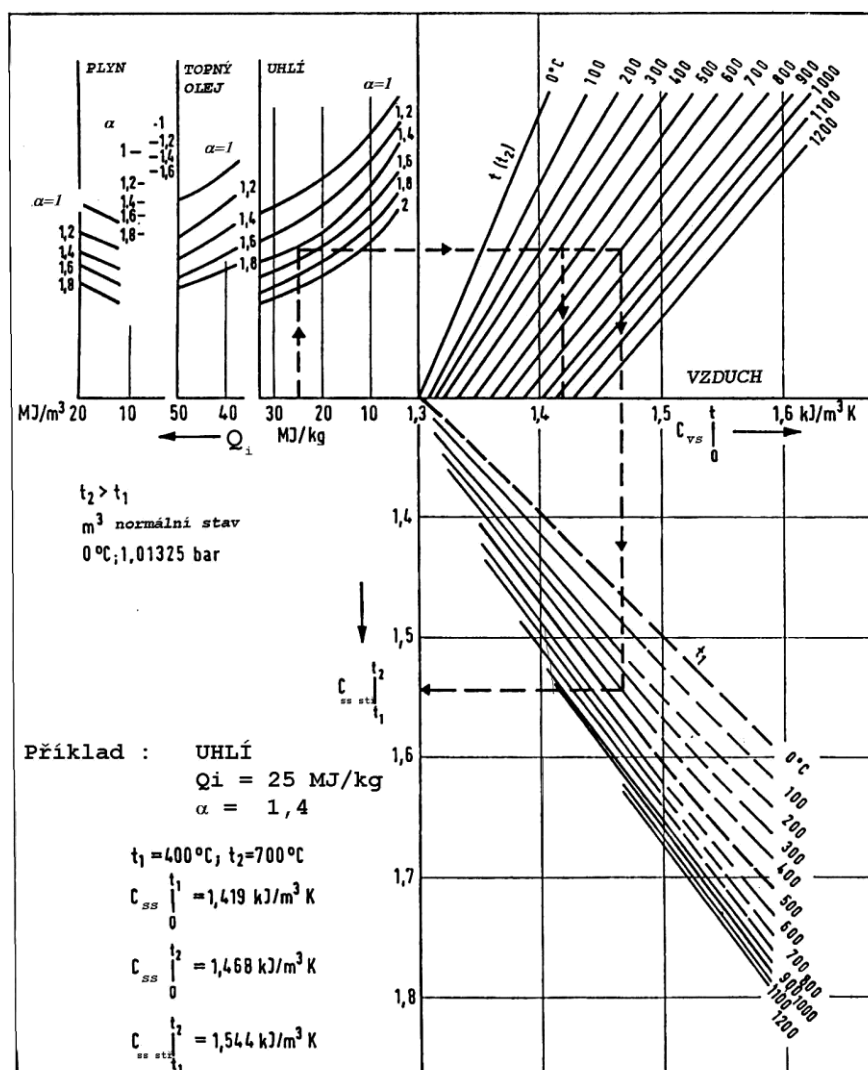
Privádíme-li do ohniště M_{pv} [kg.s⁻¹] nebo V_{pl} [m³.s⁻¹] paliva o výhřevnosti Q_i , pak palivem přivedeme tepelný výkon Q_{pv}

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

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

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

kde je $O_{VV} = \alpha \cdot O_{VV \min}$ objem vlhkého spalovacího vzduchu na jednotku paliva [m³.kg⁻¹, resp. m³.m⁻³] a c_v [kJ.m⁻³.K⁻¹] 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 α pak je

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

kde je O_{SV} objem vlhkých spalín při přebytku vzduchu α na jednotku paliva [m³.kg⁻¹, nebo m³.m⁻³]

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

c_s [kJ.m⁻³.K⁻¹] je měrná tepelná kapacita spalín při teplotě t_s a přebytku vzduchu α .

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 spalín

Při přesnějších tepelných bilancích kotlů a spalínových výměníků je třeba vyjadřovat teplo, které je spalínám odebráno. K tomuto účelu je vhodnější využít entalpii spalín lépe než výše uvedenou měrnou tepelnou kapacitu. Pro zjednodušení bilančních vztahů je výhodnější nepracovat s měrnou entalpií spalín vztaženou na jednotku jejich objemu nebo hmotnosti, ale jako základní vztažnou jednotku brát objem spalín, který přísluší spálení jednotkového množství paliva. Jednotkou entalpie spalín 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 spalínách se získají stechiometrickým výpočtem, obsah popílku se zjistí z bilance popela v kotli. Pro běžnou praxi je proto postačující použít při vyjádření entalpie spalín objemy složek podle modelu dokonalého spalování.

Entalpii spalín o teplotě t [°C], které vzniknou po spálení 1 kg tuhého či kapalného paliva nebo 1 Nm^3 plynu s přebytkem vzduchu α , je dána vztahem

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

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

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

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

V těchto výrazech představují h_i^t [kJ/Nm³] měrné entalpie složek spalín 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

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

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

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

tab. 1-3 Měrná entalpie některých složek spalín h_i^t [kJ/Nm³] 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	-

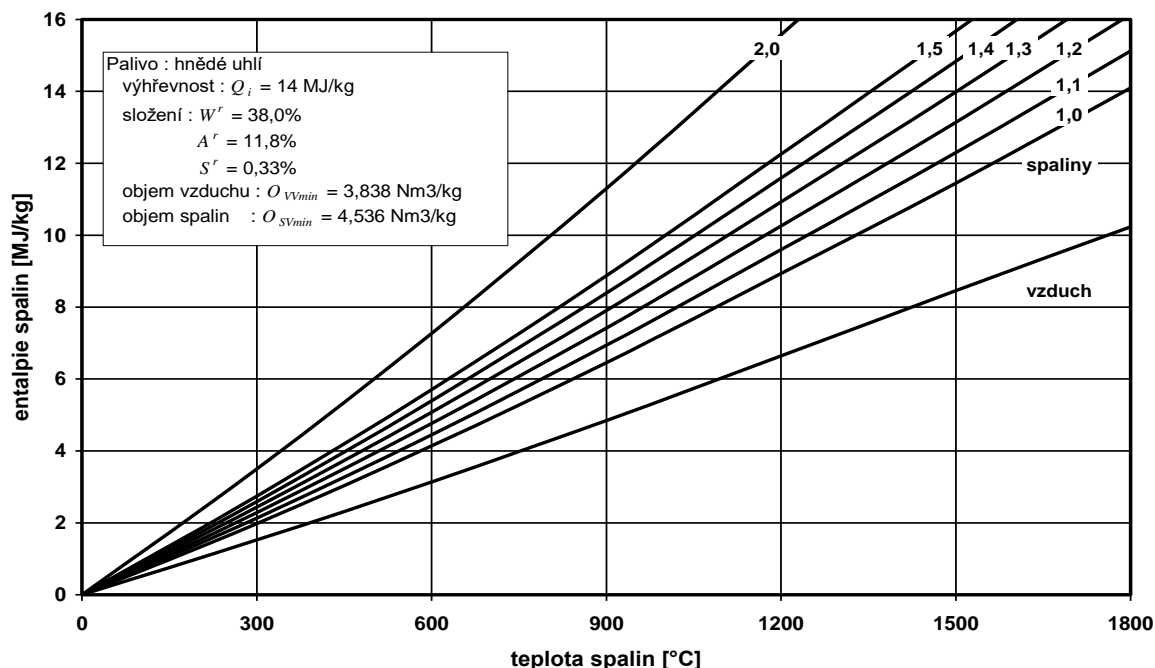
Podobně jako u stechiometrického výpočtu je i entalpie spalín svázána s konkrétním složením paliva a jakákoli jeho změna znamená i změnu jejich entalpie.

Pro zjednodušení práce při opakovaném bilancování výměníků v kotli se doporučuje sestavit I-t diagram spalín, který zachycuje graficky závislost entalpie spalín 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 spalín 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 H-t tabulky spalin [°C]

t [°C]	H_{Smin}^t [kJ/kg]	H_{Vmin}^t [kJ/kg]	$H_S^{t,\alpha} = H_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot H_{Vmin}^t$ [kJ/kg]					
			α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	



obr. 1-2 H-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 množstvím spáleného paliva M_{pv} [kg/s] resp. [Nm³/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

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

a průtok spalin

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

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

2. Nedokonalé spalování a kontrola spalování

2.1. Vliv na složení a objem spalin

Poněkud složitější poměry nastanou při spalování nedokonalém. Mechanismus nedokonalého spalování je pro skutečné energetické procesy (splňující podmínky zákona o ochraně ovzduší) omezen v podstatě na problematiku spalování uhlíku. Uhlík totiž nemusí v procesu hoření shořet vůbec – jedná se o nespálený uhlík v popelu (mechanický nedopal u pevných paliv) nebo o saze, které se mohou vyskytovat u všech typů paliv, avšak zejména u topných olejů, u kterých se provádí standardní zkouška sazivosti (určení tzv. Bacharachova čísla). Uhlík, který shořel na plynnou formu se ovšem může vyskytovat jak ve formě finální molekuly CO₂, tak jako meziprodukt CO (chemický nedopal), jehož koncentraci ve spalinách striktně omezuje vyhláška č.356/2002 (570/2006) k zákonu „o ovzduší“. Koncentrace CO ve spalinách za energetickými zdroji jsou proto povinně měřeny a to ať již jednorázově nebo kontinuálně.

Spalování uhlíku C na CO probíhá podle spalovací rovnice :



Molekulární objemové poměry výše uvedené spalovací rovnice lze zapsat následovně :

$$12 \text{ kg C} + 11,195 \text{ m}^3 \text{ O}_2 = 22,4 \text{ m}^3 \text{ CO}$$

$$1 \text{ kg C} + 0,932 \text{ m}^3 \text{ O}_2 = 1,865 \text{ m}^3 \text{ CO}$$

Z výše uvedeného vyjádření je zřejmé, že objem plyných spalin při spálení C na CO se oproti spálení na CO₂ téměř nezmění, avšak spotřeba O₂ je poloviční (a obdobně i spalovacího vzduchu) a uvolní se pouze cca třetina latentního tepla obsaženého v uhlíku.

Nedokonalost spalování se v tepelných bilancích vyjadřuje ztrátou hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanickým nedopalem) a ztrátou hořlavinou ve spalinách (chemickým nedopalem). Ztráta mechanickým nedopalem respektuje teplo ztracené v důsledku nespálení uhlíku, který zůstává ve škváře, strusce nebo v úletu. Ztráta chemickým nedopalem vyjadřuje teplo, které je ztraceno neúplným spálením uhlíku na oxid uhelnatý CO. Z tohoto pohledu je možné uhlík v palivu rozdělit na tři části :

- *a* hoří nedokonale na CO
- *b* nevyhoří vůbec
- $(1 - a - b)$ hoří dokonale na CO₂

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

$$a = \frac{Z_{co} \cdot Q_i}{(33828,5 - 10334) \cdot C^r} \quad b = \frac{Z_c \cdot Q_i}{33828,5 \cdot C^r} \quad [-] \quad (2.1)$$

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 CO₂ a CO.

Nedokonalé spálení uhlíku se projeví ve změně složení a objemu spalin. Ve stechiometrických spalinách ($\alpha = 1$) se proti případu dokonalého spalování v důsledku neúplného spálení uhlíku zmenší obsah CO₂, přibude CO a nevyužitý kyslík. Jejich objemy je možné vyjádřit jako:

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.2)$$

objem oxidu uhelnatého

$$O_{CO}^N = a \cdot \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.3)$$

objem kyslíku

$$O_{O_2}^N = \left(\frac{a}{2} + b \right) \cdot \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.4)$$

minimální objem suchých spalin při nedokonalém spalování pak je

$$O_{SS \min}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.5)$$

kde ostatní hodnoty jsou stejné jako u vztahu pro dokonalé spalování. Minimální objem vlhkých spalin je dán vztahem

$$O_{SV \min}^N = O_{SS \min}^N + O_{H_2O}^S \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.6)$$

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

$$O_{SV}^N = O_{SV \min}^N + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (2.7)$$

Z výše uvedených vztahů je možné spočítat, že objem plyných spalin se při nedokonalém spalování téměř nezmění, avšak spotřeba O₂ je nižší (a obdobně i spalovacího vzduchu). Nespotřebovaný kyslík přechází do spalin a spolu s přebytkem vzduchu se podílí na celkové koncentraci kyslíku ve spalinách, kterou vyhodnocujeme při provádění chemické analýzy spalin.

2.2. Kontrola jakosti spalování

Kontrola jakosti spalování obvykle spočívá ve stanovení přebytku spalovacího vzduchu a jemu odpovídajících ztrát nedokonalostí spalování. K tomu je třeba provést :

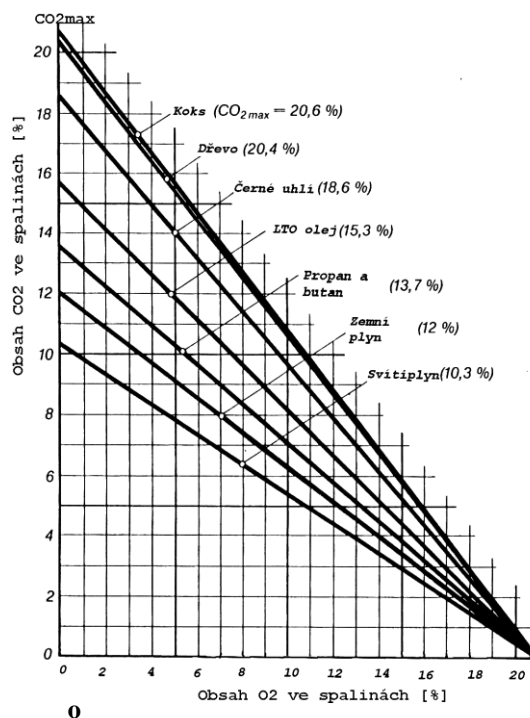
- chemickou analýzu spalin s cílem určit obsah O₂ a CO (případně i dalších emisních látek) – provádí se speciálními analyzátory spalin

- chemický rozbor tuhých zbytků po spalování (škvára, úlet) s cílem určit podíl spalitelných látek – provádí se rozбором odebraných vzorků tuhých zbytků ve specializovaných laboratořích

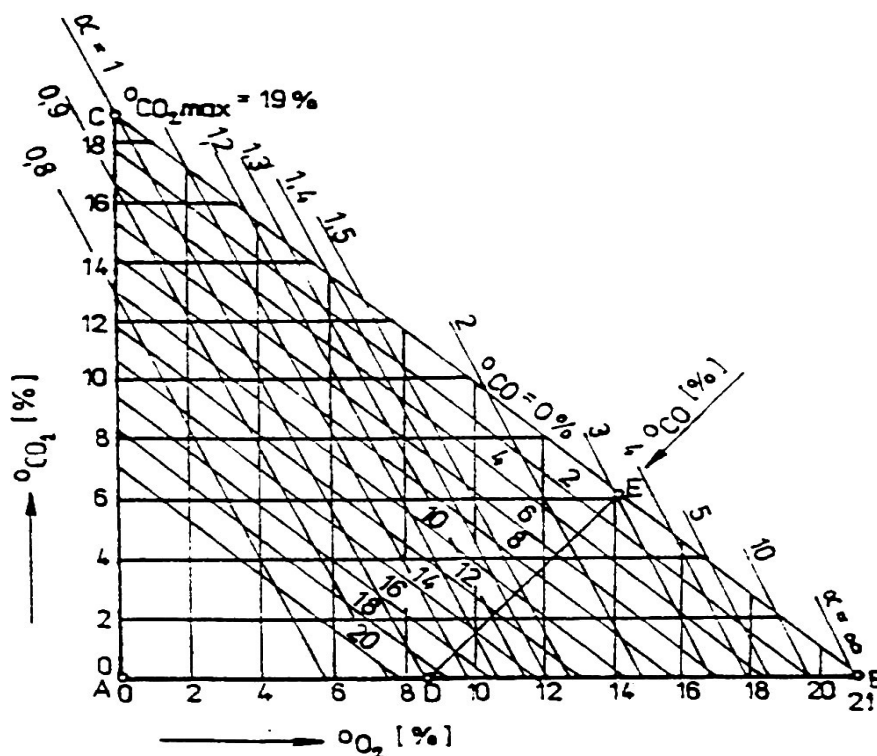
Z těchto hodnot jsou bezprostředně k dispozici pouze výsledky chemické analýzy spalin, rozhory tuhých zbytků z laboratoře jsou k dispozici s odstupem řádově hodin až dnů. Často se proto spalování hodnotí zjednodušeně pouze podle obsahu O_2 a CO ve spalinách.

Ve spalinách z konkrétního paliva platí, že při dokonalém i nedokonalém spalování musí vzájemně odpovídat měřením určené složky suchých spalin a to obsah CO_2 , v případě nedokonalého spalování i obsah CO s obsahem O_2 (resp. přebytkem vzduchu α). Na obr. 2-1 je uveden spalovací trojúhelník podle Bunteho, který platí pro vzájemnou závislost mezi obsahem O_2 a CO_2 v suchých spalinách při dokonalém spalování pro všechna paliva.

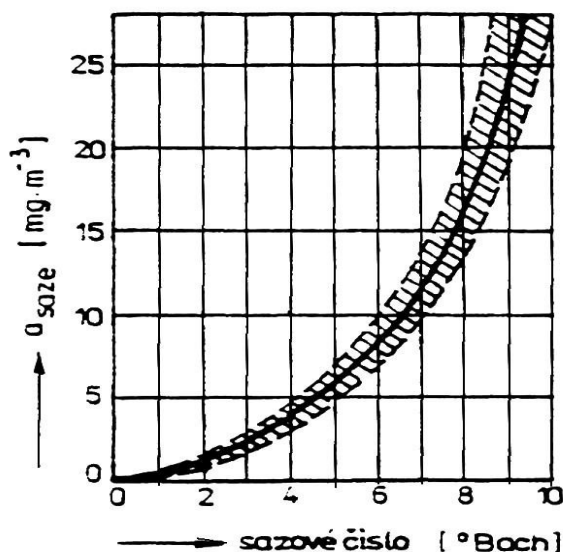
Pro dokonalé i nedokonalé spalování a s ohodnocením součinitele přebytku spalovacího vzduchu pro konkrétní stav suchých spalin se používá Ostwaldův spalovací trojúhelník. Tento trojúhelník je nutno sestavovat individuálně pro každé palivo, podle jeho prvkového složení. Kromě individuální maximální hodnoty pořadnice na ose „y“, kterou je jako u Bunteova trojúhelníku hodnota $CO_{2\max}$, se musí pro každé palivo určit bod „D“ (viz. ukázkou Ostwaldova spalovacího trojúhelníku na obr. 2-2), který charakterizuje stav, kdy je uhlík spálen pouze na CO (hodnota CO_{\max} v bodě D) a tomuto stavu odpovídající spotřebu kyslíku. Spojnice tohoto bodu „D“ a vrcholu trojúhelníku $CO_{2\max}$ je přímka, na které leží hodnoty, pro které platí, že součinitel přebytku vzduchu $\alpha = 1$. Vlevo od této přímky jsou stavy s $\alpha < 1$, vpravo pak $\alpha > 1$. Na přeponě trojúhelníku leží všechny stavy spalin odpovídající dokonalému spalování s odečitatelnými hodnotami součinitele přebytku spalovacího vzduchu ($1/\alpha$) a současně platí, že jde-li o dokonalé spalování, musí změřené hodnoty pořadnic $CO_{2\text{měř}}$ a $O_{2\text{měř}}$ ležet na této přeponě ($CO = 0$) a pouze vrchol $CO_{2\max}$ odpovídá teoretickému výpočtovému stavu suchých spalin, tzn. dokonalé spalování bez přebytku vzduchu.



obr. 2-1 Spalovací trojúhelník podle Bunteho



obr. 2-2 Příklad konstrukce Ostwaldova spalovacího trojúhelníku pro hnědé uhlí



obr. 2-3 Závislost koncentrace sazí ve spalinách na sazovém čísle podle Bacharacha

2.3. Určení součinitele přebytku vzduchu u stávajících kotlů

U stávajících kotlů je možné určit součinitel přebytku vzduchu ve spalinách na základě provedené analýzy vzorku spalin, jejímž výsledkem jsou objemové koncentrace plynných složek. Pro určení přebytku vzduchu ve spalinách pak může posloužit např. Ostwaldův trojúhelník nebo nejrůznější výpočtové vztahy. Pokud palivo neobsahuje volný CO_2 nebo uhličitany, platí pro známou objemovou koncentraci oxidu uhličitého v suchých spalinách o_{CO_2} [-] při dokonalém spalování

$$\alpha = 1 + \left(\frac{O_{CO_2}}{O_{SS\ min} \cdot o_{CO_2}} - 1 \right) \cdot \frac{O_{SS\ min}}{O_{VS\ min}} \quad [-] \quad (2.8)$$

Jestliže známe objemovou koncentraci kyslíku v suchých spalinách o_{O_2} [-], lze určit součinitel přebytku vzduchu podle vztahu

$$\alpha = \frac{0,21 + \left(\frac{O_{SS\ min}}{O_{VS\ min}} - 1 \right) \cdot o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}} \quad [-] \quad (2.9)$$

V případě paliv, kde $O_{SS\ min} \doteq O_{VS\ min}$ lze výše uvedené vztahy upravit s malou nepřesností na tvar

$$\alpha = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS\ min} \cdot o_{CO_2}} = \frac{o_{CO_2\ max}}{o_{CO_2}} \quad [-] \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{0,21}{0,21 - o_{O_2}} \quad [-] \quad (2.11)$$

Tyto vztahy jsou v praxi běžně užívány i při nedokonalém spalování, proto jsou jimi určené hodnoty přebytku vzduchu zatíženy chybou podle míry nedopalu paliva. K dispozici jsou i přesnější vztahy respektující vliv nedokonalosti spalování, které dávají přesnější, mírně menší hodnoty α .

Je třeba zdůraznit, že odběru vzorku spalin pro analýzu je třeba věnovat mimořádnou pozornost a pro získání reprezentativních výsledků provádět síťové měření v celém řezu spalinového tahu. Takovéto měření je u velkých kotlů velmi komplikované a vyžaduje speciální vybavení především pro oblasti vysokých teplot za ohništěm.

V dřívější době se Ostwaldův a Bunteův spalovací trojúhelník používaly ke kontrole spalovacího procesu. Dnes mají význam poněkud jiný. Oba trojúhelníky názorně ukazují pevnou závislost mezi složkami suchých spalin CO , CO_2 a O_2 . Můžeme je proto dnes výhodně uplatnit jako jednu z kontrol běžně používané měřicí techniky odpovídajících složek spalin.

Pro spalovací procesy na topné oleje se jako kontrola nedokonalosti spalování používá zjišťování koncentrace sazí ve spalinách Bacharachovým přístrojem s porovnávací stupnicí tmavosti zabarvení kontrolního filtračního papírku s hodnotami 1 až 10. Sazovému číslu určenému Bacharachovým přístrojem odpovídá koncentrace sazí ve spalinách, jak ukazuje obr. 2-3.