

1. Nedokonalé spalování a kontrola spalování

1.1. 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 CO_2 , tak jako meziprodukt CO (chemický nedopal), jehož koncentraci ve spalinách striktně omezuje legislativně daným emisním limitem. 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 :

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

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

Z výše uvedeného vyjádření je zřejmé, že objem plynných spalin při spálení C na CO se oproti spálení na CO_2 téměř nezmění, avšak spotřeba O_2 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 CO_2

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

$$a = \frac{Z_{co} \cdot Q_i}{(33828,5 - 10334) \cdot C^r} \quad b = \frac{Z_c \cdot Q_i}{33828,5 \cdot C^r} \quad [-] \quad (1.1)$$

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 CO_2 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 CO_2 , přibude CO a nevyužitý kyslík. Jejich objemy je možné vyjádřit jako:

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{vs\min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.2)$$

objem oxidu uhelnatého

$$O_{CO}^N = a \cdot \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.3)$$

objem kyslíku

$$O_{O_2}^N = \left(\frac{a}{2} + b \right) \cdot \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.4)$$

minimální objem suchých spalin při nedokonalém spalování pak je

$$O_{SS\min}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.5)$$

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

$$O_{SV\min}^N = O_{SS\min}^N + O_{H_2O}^S \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.6)$$

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

$$O_{SV}^N = O_{SV\min}^N + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad (1.7)$$

Z výše uvedených vztahů je možné spočítat, že objem plynných spalin se při nedokonalém spalování téměř nezmění, avšak spotřeba O_2 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.

1.2. Kontrola jakosti spalování

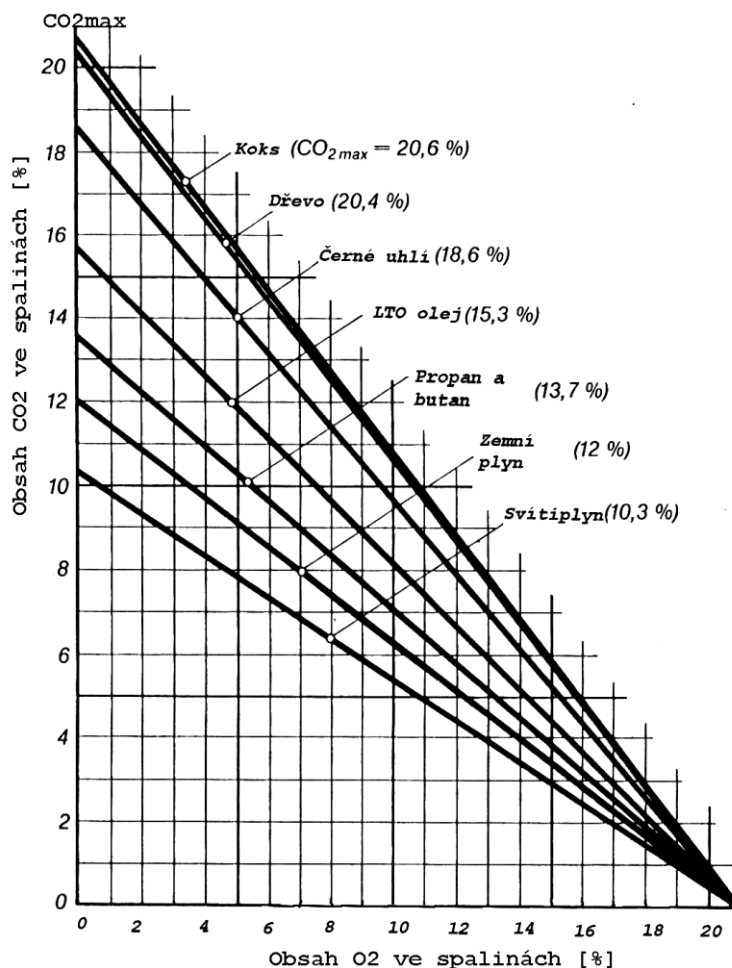
Kontrola jakosti spalování obvykle spočívá ve stanovení přebytku spalovacího vzduchu a jemu odpovídajících ztrát nedokonalostí spalování. K tomu je třeba provést :

- chemickou analýzu spalin s cílem určit obsah 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 rozбором odebraných vzorků tuhých zbytků ve specializovaných laboratořích

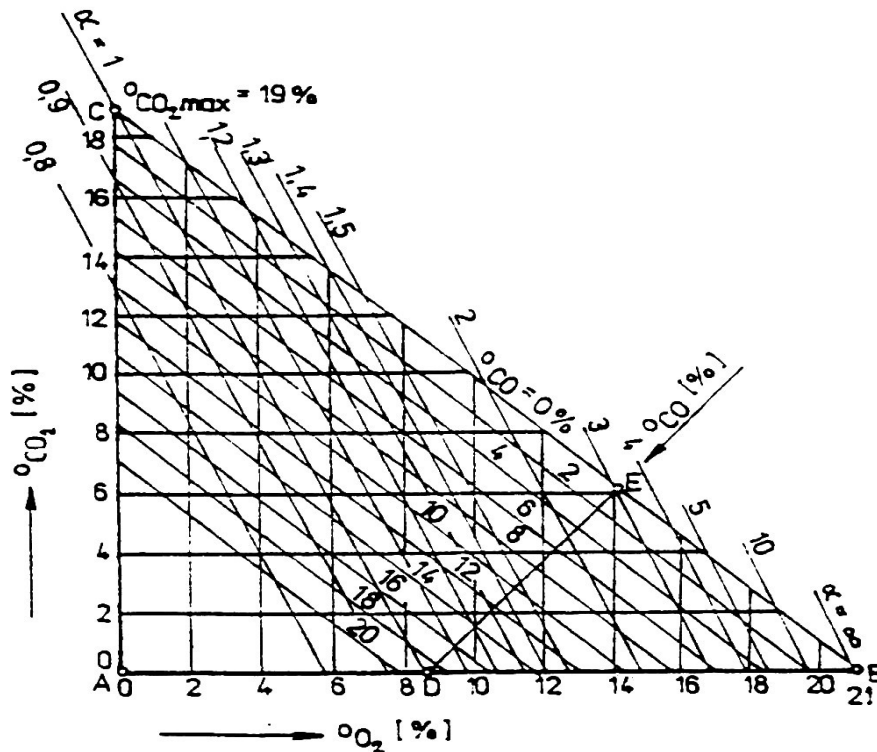
Z těchto hodnot jsou bezprostředně k dispozici pouze výsledky chemické analýzy spalin, rozhory tuhých zbytků z laboratoře jsou k dispozici s odstupem řádově hodin až dnů. Často se proto spalování hodnotí zjednodušeně pouze podle obsahu O_2 a CO ve spalinách.

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. 1-1 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.

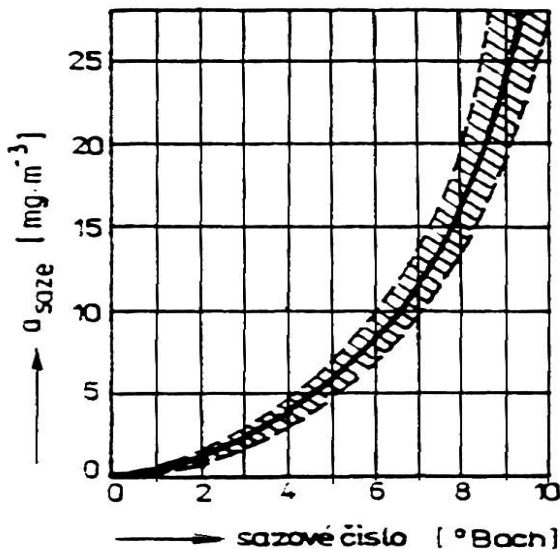
Pro dokonalé i nedokonalé spalování a s ohodnocením součinitele přebytku spalovacího vzduchu pro konkrétní stav suchých spalin se používá Ostwaldův spalovací trojúhelník. Tento trojúhelník je nutno sestavovat individuálně pro každé palivo, podle jeho prvkového složení. Kromě individuální maximální hodnoty 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. 1-2), 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. 1-1 Spalovací trojúhelník podle Bunteho



obr. 1-2 Příklad konstrukce Ostwaldova spalovacího trojúhelníku pro hnědé uhlí



obr. 1-3 Závislost koncentrace sazí ve spalinách na sazovém čísle podle Bacharacha

1.3. 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

$$\alpha = 1 + \left(\frac{o_{CO_2}}{o_{SS\min} \cdot o_{CO_2}} - 1 \right) \cdot \frac{o_{SS\min}}{o_{VS\min}} \quad [-] \quad (1.8)$$

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

$$\alpha = \frac{0,21 + \left(\frac{O_{SS\min} - 1}{O_{VS\min}} \right) \cdot o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}} \quad [-] \quad (1.9)$$

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

$$\alpha = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS\min} \cdot o_{CO_2}} = \frac{o_{CO_2\max}}{o_{CO_2}} \quad [-] \quad (1.10)$$

$$\alpha = \frac{0,21}{0,21 - o_{O_2}} \quad [-] \quad (1.11)$$

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.

2. Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Metodicky je určení účinnosti kotlů stanoveno normou ČSN 07 0302 Přejímací zkoušky parních kotlů. Lze použít dvě metody určení účinnosti kotle :

- metodu přímou
- metodu nepřímou

2.1. Přímá metoda určení účinnosti

Vychází z definice účinnosti, která říká, že účinnost je dána poměrem výkonu a příkonu podle vztahu

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{\dot{Q}_{pr}} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde \dot{Q}_{vyr} [kW] je tepelný výkon kotle a \dot{Q}_{pr} [kW] je příkon tepla v palivu

Tepelný příkon kotle se zjednodušeně stanovuje ze spotřeby paliva a jeho výhřevnosti podle vztahu

$$\dot{Q}_{pr} = M_{pv} \cdot Q_i^r \text{ resp. } V_{pl} \cdot Q_i^r \quad [\text{kW}] \quad (2.2)$$

Tepelný výkon kotle se počítá z výrobního tepla vody resp. páry v závislosti na typu a řešení kotle. V nejjednodušším případě podle vztahu

$$\dot{Q}_{vyr} = M_w \cdot c_p \cdot (t_w - t_{nv}) \text{ resp. } \dot{Q}_{vyr} = M_p \cdot (i_{pp} - i_{nv}) \quad [\text{kW}] \quad (2.3)$$

kde M_w, M_p [kg/s] je průtok vody, páry,
 c_p [kJ/kgK] je pevná kapacita vody
 t_w, t_{nv} [°C] teplota výstupní, napájecí vody
 i_{pp}, i_{nv} [kJ/kg] je entalpie páry, napájecí vody

Přímá metoda se dá poměrně dobře aplikovat u menších kotlů na ušlechtilá paliva, kde nečiní problém přesně měřit jejich spotřebu. Selhává u velkých kotlů na pevná paliva, jejichž průtok nelze dostatečně přesně určit.

2.2. Nepřímá metoda určení účinnosti

Je založena na vyhodnocení tepelných ztrát kotle, které představují rozdíl mezi jeho příkonem a výkonem. Počítá se ze vztahu

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{pr} - \dot{Q}_z}{\dot{Q}_{pr}} = 1 - \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{pr}} = 1 - \sum Z_i \quad [-] \quad (2.4)$$

kde \dot{Q}_z [kW] je ztracený výkon kotle a $\sum Z_i$ [-] představuje součet dílčích poměrných ztrát.

Poměrné tepelné ztráty kotle i jsou

- CO - hořlavinou ve spalinách
- C - hořlavinou v tuhých zbytcích
- k - fyzickým teplem spalin (komínová)
- f - fyzickým teplem tuhých zbytků
- sv - sdílením tepla do okolí

Fyzikální podstata a výpočet jednotlivých ztrát kotle

1) Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích je způsobena obsahem uhlíku v těchto tuhých zbytcích. Pod pojmem tuhé zbytky po spalení rozumíme škváru nebo strusku (s , s), popílek ve spalinách (p) a roštový propad (r). Nepatrná část popele se zplyní. Platí vztah

$$Z_C = \sum_i Q_C \cdot \frac{C_i}{1-C_i} \cdot \frac{X_i}{Q_i^r} \cdot A^r = \frac{32700 \cdot A^r}{Q_i^r} \cdot \left(\overbrace{\frac{C_s}{1-C_s} \cdot X_s}^{\text{škvára (struska)}} + \overbrace{\frac{C_r}{1-C_r} \cdot X_r}^{\text{propad}} + \overbrace{\frac{C_p}{1-C_p} \cdot X_p}^{\text{popílek (úlet ve spalinách)}} \right) \quad [-] \quad (2.5)$$

kde $Q_C = 32700$ kJ/kg je výhřevnost uhlíku (nebo laboratorně zjištěná výhřevnost hořlaviny),
 C_i (-) - obsah uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytků. U provozovaných zařízení se určuje C_i laboratorním rozбором uvažovaného druhu tuhých zbytků. U zařízení konstruovaných se používá směrných hodnot, které jsou závislé na druhu spalovaného paliva a konstrukci kotle. Největší hodnoty jsou u roštových kotlů (9-16%, v propadu až 35 %), u granulačních ohnišť 2 -15 %, u výtavných 0 %. Velmi nízké jsou též hodnoty u fluidních kotlů, zvláště fluidních kotlů s cirkulační fluidní vrstvou.
 X_i - poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků k hmotnosti popelovin v palivu (kg/kg). Experimentální zjišťování X_i je velmi obtížné, proto se používá směrných hodnot tzv. popelové bilance, závislé na druhu a velikosti spalovaného paliva a konstrukci spalovacího zařízení. Orientačně platí hodnoty z tab. 2-1. Součet $X_s + X_r + X_p = 1$.
 A^r (-) je obsah popelovin v palivu.

Ztráta, hořlavinou v tuhých zbytcích se nazývá též ztráta mechanickým nedopalem.

tab. 2-1

	X_s (%)	X_r (%)	X_p (%)
Ohniště roštová	62-77	0-6	13-33
Ohniště granulační	10-20	-	75-80
Ohniště výtavná	35-50	-	40-55
Ohniště fluidní (stacionární)	68-80	0-2	20-30
Ohniště cyklonová	70-80	-	10-20

2) Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků spočívá v nevyužitím teple odcházejících tuhých zbytků. Je dána vztahem

$$Z_f = \sum_i \frac{1}{1-C_i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{Q_i^r} \cdot A^r = \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot \left(\frac{X_s \cdot i_s}{1-C_s} + \frac{X_r \cdot i_r}{1-C_r} \right) \quad [-] \quad (2.6)$$

kde $i_i = c_i \cdot t_i$ (kJ/kg) je entalpie tuhých zbytků. Při výpočtech se pro teplotu tuhých zbytků dosazuje teplota škváry 600 °C, teplota strusky 1500 °C. Ztráta fyzickým teplem popílku se obvykle zahrnuje do ztráty fyzickým teplem spalin formou entalpie úletu (viz dále). Ztráta Z_f je při spalování kapalných a tuhých paliv nulová.

3) Ztráta hořlavinou ve spalinách je dána chemickou nedokonalostí spalování, projevující se obsahem nespálených plynů CO, H₂, CH_x event. dalšími ve spalinách.

$$Z_{CO} = (1-Z_C) \cdot O_{SV} \cdot \frac{\sum q_i}{Q_i^r} \quad [-] \quad (2.7)$$

kde $q_i = 12640 \cdot \omega_{CO} + 10800 \cdot \omega_{H_2} + 35800 \cdot \omega_{CH_4} + \dots$
 O_{SV} (Nm³/kg, Nm³/Nm³) je objem spalin z 1 kg paliva nebo 1 Nm³ plynu

Obsahy ω_{CO} , ω_{H_2} a ω_{CH_4} případně další uhlovodíky je nutno změřit v provozu. Nejsou-li tyto známy, lze použít směrných hodnot této ztráty opět v závislosti na druhu spalovaného paliva a konstrukci ohniště

$$Z_{CO} \doteq \frac{a \cdot \omega_{CO}}{\omega_{CO} + \omega_{CO_2}} \quad [-] \quad (2.8)$$

kde ω_{CO} a ω_{CO_2} jsou objemové koncentrace CO a CO₂ ve spalinách za kotlem
 a je konstanta závislá na druhu paliva – pro ČU $a = 0,60$, pro HU $a = 0,65$, pro kapalná paliva $a = 0,45$,
Ztráta hořlavinou ve spalinách se nazývá též ztráta chemickým nedopalem.

4) Ztráta fyzickým teplem spalin je dána energií odcházejících plynných spalin. Přibližně ji lze určit ze vztahu

$$Z_k = (1-Z_C) \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_i} \quad [-] \quad (2.9)$$

kde $I_S^{t_k, \alpha_k}$ [kJ/kg_{paliva} resp. kJ/Nm³_{plynu}] je entalpie spalin za kotlem $I_S^{t_{vz}, \alpha_k}$ [kJ/kg_{paliva} resp. kJ/Nm³_{plynu}] je entalpie spalin při teplotě vzduchu v kotelně t_{vz} [°C].

Obvykle se označuje jako komínová ztráta. Bývá většinou největší ztrátou kotle. Má na ni rozhodující vliv teplota spalin za kotlem t_s a součinitel přebytku vzduchu za kotlem α (souvisí s těsností kotle a přísávaním falešného vzduchu).

5) Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením je funkcí velikosti kotle a druhu spalovaného paliva.

Fyzikální výpočet spočívající v aplikaci Stefan-Boltzmannova zákona sálání by byl velmi pracný, a proto se používá diagramu z obr. 2-1, v němž je respektován i vliv tepelného výkonu. S jeho klesáním ztráta Z_{sv} vzrůstá.

obr. 2-1 Ztráta sdílením tepla sáláním a vedením do okolí

Je třeba si uvědomit, že účinnost kotle není konstantní, mění se

- s výkonem kotle
- se změnou provozních parametrů kotle
- s vlastnostmi paliva apod.

Proto v ročních bilancích **nelze počítat se jmenovitou účinností kotle**, nýbrž s účinností průměrnou, která respektuje

- závislost účinnosti na výkonu kotle
- počet najíždění kotle ze studeného stavu
- udržování kotle v teplé záloze atd.

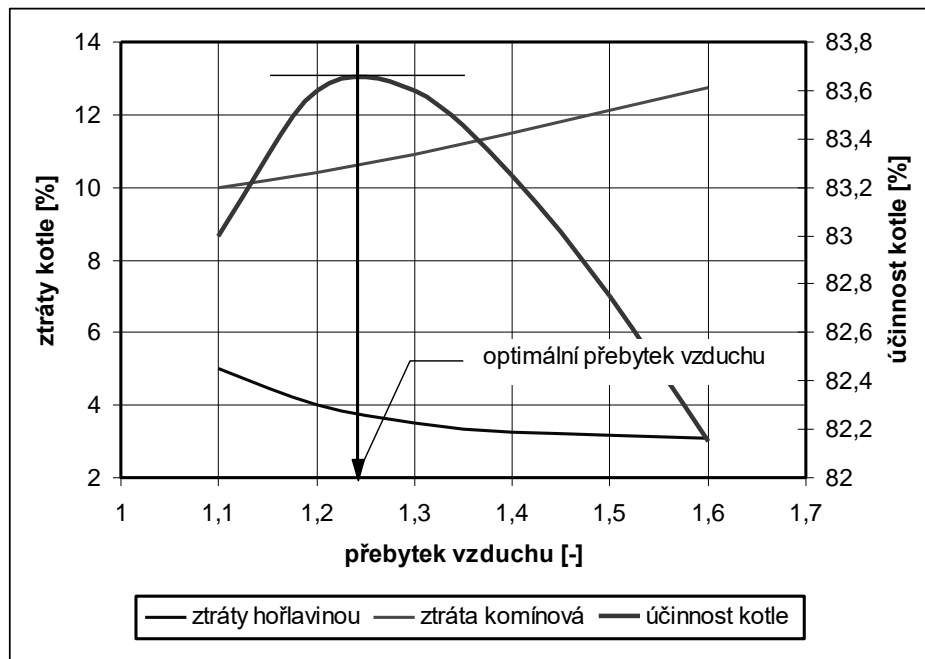
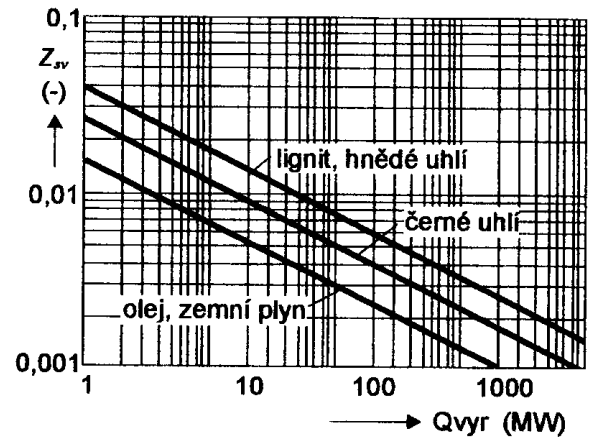
•

3. Optimalizace spalovacího procesu

Optimalizaci spalovacího procesu lze provádět z různých hledisek. Obvykle se uplatňuje kritérium ekonomické a ekologické, jinak řečeno kotel se seřizuje tak, aby pracoval s nejvyšší účinností a minimálními emisemi znečišťujících látek. V závislosti na druhu paliva a konkrétním typu spalovacího zařízení se jedná o více či méně komplikovaný proces, který se provádí postupným doregulováním za současného měření určujících parametrů. Kotel při tom nelze seřídít pouze při jednom výkonu, ale nastavení musí být provedeno postupně v celém provozním pásmu.

Obvykle se optimalizace spalovacího procesu u stávajících kotlů provádí úpravou množství a distribuce spalovacího vzduchu. Při seřizování provozu na maximální účinnost se projevují dva vzájemně protichůdné účinky. S rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu

- klesají ztráty hořlavinou ve spalinách a tuhých zbytcích
- roste ztráta komínová



obr. 3-1 Princip optimalizace spalovacího procesu

Vliv přebytku vzduchu na velikost ostatních ztrát se obvykle zanedbává. Změna velikosti dvou zmíněných ztrát podle přebytku vzduchu je naznačena na obr. 3-1. S použitím vztahu pro výpočet nepřímé účinnosti kotle pak lze

vynést její průběh v závislosti na přebytku vzduchu, který je extrémní. Poloha jeho maxima (vrcholu křivky) určuje optimální hodnotu přebytku vzduchu, při němž bude dosaženo maximální účinnosti kotle. Následně je třeba ověřit, že v tomto bodě jsou splněny emisní limity, a to konkrétně limitní koncentrace CO a NO_x ve spalinách. Obecně platí, že pokud by byl optimální přebytek vzduchu příliš nízký, mohlo by dojít k překročení limitní koncentrace CO v důsledku nedokonalého průběhu hoření. To by mohlo být upraveno přerozdělením primárního a sekundárního (dohořivacího) vzduchu. Naopak, pokud by byl optimální přebytek vzduchu příliš vysoký, hrozí překročení limitu NO_x v důsledku zvýšené tvorby termických oxidů dusíku. I zde by bylo možné poměry částečně upravit přerozdělením spalovacího vzduchu. Jedná se však o zcela individuální podmínky dané konkrétními vlastnostmi paliva a spalovacího zařízení, které lze jen obtížně zobecnit. Optimální nastavení kotle vyžaduje značný cit a zkušenost.