

Emisní faktory znečišťujících látek ze spalování hnědého uhlí ve spalovacích zařízeních malých výkonů

Ing. Jiří Horák, Ph.D.¹, Ing. František Hopan¹, Ing. Kamil Krpec¹, Ing. Milan Dej, Ph.D.¹, Ing. Michal Šyc, Ph.D.²

¹Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, vec@vsb.cz

²Akademie věd České republiky, Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i.

Přijato: 1. 10. 2009, recenzováno: 23. 11. a 24. 11. 2009

Abstrakt

Hnědé uhlí bylo opakovaně spalováno ve čtyřech různých typech spalovacích zařízení, která reprezentují čtyři základní konstrukční typy teplovodních kotlů (od nejlevnějšího a nejjednoduššího až po moderní). U základních ukazatelů kvality spalovacího procesu (CO a TOC), byly zjištěny cca o dva řády nižší hodnoty emisních faktorů u moderních spalovacích zařízení než u zařízení starších konstrukcí (např. pro CO z hodnot cca 100 g/kg na hodnoty cca 2 g/kg). Stejný trend byl pozorován u PAU (z hodnot cca 50 g/kg na cca 0,3 g/kg). Stanovené emisní faktory I-TEQ PCDD/F byly u moderních kotlů nižší než u kotlů starších konstrukcí. Obecně ale byly hodnoty stanovených emisních faktorů nízké (cca 0,05–1 ng/kg) oproti emisním faktorům používaným pro bilanční výpočty v ČR (6 ng/kg). To je zřejmě způsobeno nízkým obsahem chloru v palivu použitým při experimentech (cca 40 mg/kg). Výsledné emisní faktory ukazují na možnost snížení emisí použitím moderních typů spalovacích zařízení. Cena těchto zařízení je ovšem tři až pětinašobně vyšší.

Emission factors of pollutants from brown coal combustion in combustion furnaces of small outputs

Brown coal used to be burned in various types of combustion facilities representing four basic designs of hot water boilers (from the cheapest and simplest up to the most advanced ones). Regarding basic quality indicators of the combustion process (CO and TOC), they found out that emission factors values were an order of two lower for advanced combustion facilities than at the older design facilities (e.g. for CO from the values of ca 100 g/kg to the values of ca 2 g/kg). The same trend has been monitored for PAU (from the values of ca 50 g/kg to ca 0,3 g/kg). The defined emission factors I-TEQ PCDD/F were lower at the advanced boilers than the older design boilers. Generally the values of the defined emission factors were low (ca 0,05–1 ng/kg) compared with the emission factors used for balance calculations in the Czech Republic (6 ng/kg). That may be due to the low chlorine content in the fuel used for the experiments (ca 40 mg/kg). The resulted emission factors show the possibility of decreasing the emissions using advanced types of combustion facilities. But the costs of these boilers are three to five times higher.

Emissionsfaktoren von verunreinigenden Stoffen aus der Braunkohlen-verbrennung in Verbrennungsanlagen mit kleiner Leistung

Die Braunkohle wurde in vier verschiedenen Typen von Verbrennungsanlagen wiederholt verbrannt, die vier grundlegende Konstruktionstypen von Warmwasserkesseln (von den billigsten und einfachsten bis zu den modernsten) vertreten. Bei den Grundkennziffern für die Qualität des Verbrennungsprozesses (CO und TOC) wurden bei den modernen Verbrennungsanlagen um ca. zwei Ziffern Stellen niedrigere Werte der Emissionsfaktoren ermittelt als bei den Anlagen älterer Bauweise (z.B. für CO von den Werten von ca. 100 g/kg auf ca. 2 g/kg). Der gleiche Trend wurde bei PAU (von den Werten ca. 50 g/kg auf ca. 0,3 g/kg) gemerkt. Die festgelegten Emissionsfaktoren I-TEQ PCDD/F wurden bei den modernen Kesseln niedriger als die bei den Kesseln älterer Bauweise. Allgemein aber wurden die Werte der festgelegten Emissionsfaktoren niedrig (ca. 0,05–1 ng/kg) gegenüber den Emissionsfaktoren, die für Bilanzberechnungen in der ČR genutzt werden (6 ng/kg). Verursacht ist es offenbar durch den niedrigen Chlorgehalt in dem bei den Experimenten angewendeten Brennstoff (ca. 40 mg/kg). Die resultierenden Emissionsfaktoren zeigen die Möglichkeit Emissionen mit dem Einsatz von modernen Typen der Verbrennungsanlagen zu vermindern. Der Preis dieser Anlagen ist aber drei- bis fünfmal höher.

Klíčová slova: emisní faktor, malé zdroje, hnědé uhlí, spalování.

Keywords: emission factor, small sources, brown coal, combustion.

1 Úvod

V České republice v roce 2007 asi 18 % domácností [1] používalo k vytápění tuhá paliva, zvláště pak uhlí a dřevo. Přestože tento podíl není dominantní, tak emise znečišťujících látek z těchto zařízení značným způsobem ovlivňují kvalitu ovzduší. Cca 66 % z celkových ročních emisí polyaromatických uhlovodíků (PAU) vypuštěných v ČR do ovzduší má svůj původ v lokálních topeništích. U polévacího prachu (PM₁₀) je tento podíl na úrovni cca 35 % [2]. Podíl malých zdrojů znečišťování ovzduší na emisích TEQ PCDD/F se pohybuje okolo 10 % [3]. V období topné sezóny je možné intenzitu znečišťování ovzduší pozorovat pouhým okem viz obr. 1.

Jako kvalitativní parametr pro porovnání množství znečišťujících látek je používán emisní faktor (EF). EF vyjadřuje střední množství vzniklé sledované škodliviny v daném spalovacím zařízení za definovaných podmínek při spálení jednotkového množství daného surového paliva.

2 Materiál a metody

Hnědé uhlí bylo spalováno ve čtyřech různých typech teplovodních kotlů (označeno A až D), které reprezentují rozdílné způsoby spalování viz obr. 2. Spaliny byly naředěny v ředicím tunelu [4], kde byly uskutečněny odběry pro stanovení sledovaných složek spalin. Ředicí tunel zlepšuje podmínky pro



Obr. 1: Pohled na vesnici v topné sezóně

reprezentativnější izokinetické odběry vzorků spalín ve srovnání s odběry přímo za spalovacím zařízením.

A – zařízení staré konstrukce - prohořivací způsob spalování – ruční periodické přikládání paliva – spaliny procházejí celou přiloženou vrstvou paliva,

B – zařízení staré konstrukce - odhořivací způsob spalování – ruční přikládání paliva – spaliny neprocházejí celou přiloženou vrstvou, palivo se postupně sesouvá do oblasti spalovací komory,

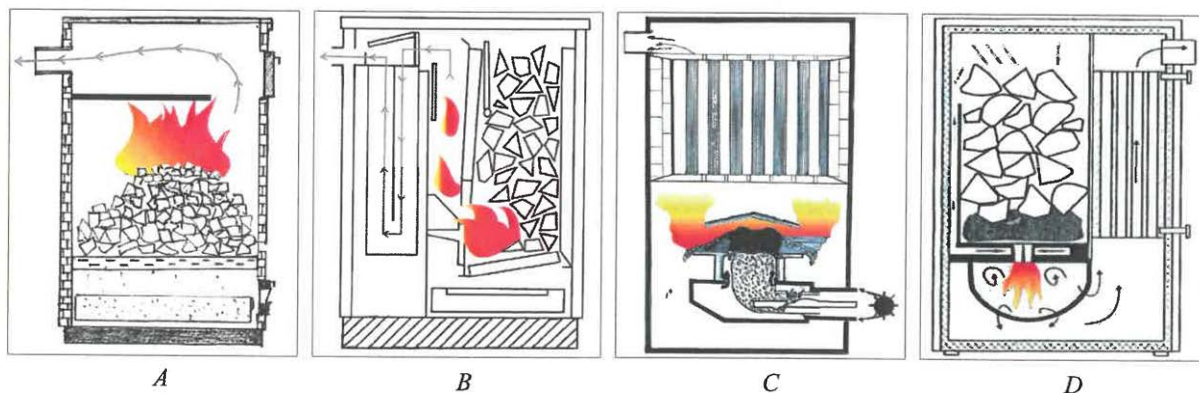
C – zařízení moderní konstrukce - odhořivací způsob spalování – automatické přikládání paliva pomocí šnekového dopravníku (zespodu) – spalování probíhá v oblasti spalovací komory, kde je umístěn hořák, do něj je mechanicky dopravováno palivo v krátkých časových intervalech (cca desítky sekund),

D – zařízení moderní konstrukce – zplyňovací – ruční přikládání paliva – spaliny neprocházejí vrstvou paliva, palivo je zplyněno a vytvořený plyn hoří v samostatné spalovací komoře (označení této technologie není jednotné, jsou používány pojmy jako generátorové zplyňování, pyrolýzní spalování, dřevozplyňující kotle).

Jako palivo bylo použito hnědé uhlí velikosti ořech 1 (20 až 40 mm) pocházející ze Severočeských dolů (rozběr paliva viz tabulka 1). Jedná se o nejprodávanější palivo tohoto typu v ČR.

Odběr základních plyných znečišťujících složek spalín (CO , NO_x , SO_2 a VOC vyjádřeno jako TOC) byl prováděn v izolovaném komíně cca 1 metr za spalovacím zařízením dle ČSN EN 303-5. Složky CO , NO_x a SO_2 byly stanovovány na principu absorpce infračerveného záření dle ČSN EN 15058 (CO), ČSN ISO 10849 (NO_x), ČSN ISO 7935 (SO_2), ČSN ISO 10396 (norma pro odběr). TOC byl stanovován principem využívajícím vlastnosti plamenoionizačního detektoru dle ČSN EN 12619. Odběry vzorků pro stanovení polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů (PCDD/F), polychlorovaných bifenylů (PCB) a polyaromatických uhlovodíků (PAU) byly prováděny dle standardizovaného postupu ČSN EN 1948. Odběry tuhých znečišťujících látek (TZL) byly prováděny dle ČSN ISO 9096.

Pro reprezentativní odběry vzorku PCDD/F, PCB, PAU a TZL je důležité dodržení izokinetických podmínek odběru. Proto byly tyto látky vzorkovány v ředícím tunelu, kde jsou izokinetické podmínky vzorkování příznivější. Poměr ředění spalín vzduchem byl zhruba 1:5 [3].



Obr. 2: Schématické znázornění typů konstrukcí použitých spalovacích zařízení

Tab. 1: Rozbor paliva použitého pro spalovací zkoušky

Hrubý rozbor		Prvkový rozbor	
Voda ^r (hm. %)	27,5	C ^d (wt. %)	64,6
Popelovina ^r (hm. %)	4,2	H ^d (wt. %)	5,3
Prchavá hořlavina ^r (hm. %)	68,3	N ^d (wt. %)	0,9
Popelovina ^d (hm. %)	5,8	O ^d (wt. %)	22,5
Prchavá hořlavina ^d (hm. %)	94,2	S ^d (wt. %)	0,9
Výhřevnost (MJ/kg)	19,1	Cl ^d (mg/kg)	40

^d - v bezvodém stavu, ^r - v surovém stavu

3 Výsledky a diskuse

Všechna výše uvedená zařízení byla dle možností provozována běžným způsobem dle pokynů výrobců zařízení. Průměrné tepelné výkony a teploty spalin s označením jednotlivých experimentů jsou uvedeny v tabulce 2. Pro experiment A1 byla charakteristická zvýšená tvorba produktů nedokonalého spalování (max. hodnoty CO byly až 11 obj. %) a odběry spalin pro analýzy byly doprovázeny značnými komplikacemi. Docházelo k blokadě filtrů vlivem kondenzací dehtů. Proto byla při experimentech A2 a A3 zkrácena doba přikládání paliva na 30 minut. Jedná se o nestandardní provoz zařízení, který umožnil sledovat i vliv zkrácení doby přikládání.

Celkem bylo provedeno dvanáct cca tři až šestihodinových spalovacích zkoušek na čtyřech teplovodních kotlích s jedním

typem hnědého uhlí. V tabulce 2 jsou uvedena komplexní data o experimentech a stanovené emisní faktory.

Z experimentů bylo zjištěno, že kotel A pracuje s výrazným rysem periodicity. V první fázi dochází k ohřevu a sušení paliva, následně je uvolňována a spalována prchavá hořlavina a v poslední fázi dochází k oxidaci odplyněného fixního uhlíku. Tyto fáze neprobíhají zcela odděleně, ale dochází k jejich částečnému prolnutí. Uvedenou periodicitu je možno sledovat např. z koncentrací O₂, CO, TOC ve spalinách. Ze srovnání výsledků experimentů A1, A2 a A3 je možné vidět, jak důležitým faktorem u tohoto typu zařízení je četnost přikládání a obecně způsob dopravy paliva do spalovací komory. Zkrácením periody došlo k čtyřnásobnému snížení produkce CO, TOC i PAU. Množství vzniklých PCDD/F (I-TEQ) kleslo na polovinu, pouze množství PCB zůstalo nezměněno.

Produkce znečišťujících látek na kotli B není již tak úzce svázaná s periodicitou přikládání paliva, protože palivo není přikládáno přímo do spalovací komory. Dávka paliva je dopravena do násypky, která je umístěna nad spalovací komorou, ale spaliny celou vrstvou paliva neprocházejí. Palivo je do spalovací komory postupně sesouváno gravitační silou tak, jak dochází k odhořívání paliva v ohništi, které je ve spodní části násypky. Všechny výše uvedené fáze spalování probíhají současně pouze na určité části přiloženého paliva.

Palivo v kotli C prochází také výše uvedenými fázemi hoření. Zásadní rozdíl je v periodě a způsobu dopravy paliva do spalovací komory. Šnekový dopravník přivádí palivo ze zásobníku do spalovací komory a jeho chod je řízen automatickou

Tab. 2: Základní data o provozu zařízení a emisní faktory základních a vybraných organických složek spalin

Označení kotle		A			B	C	D
Typ kotle (zařízení)		staré - prohořívací			staré - odhořívací	moderní - odhořívací	moderní - zplynovací
Označení experimentu		A1	A2	A3	B1, B2, B3	C1, C2, C3	D1, D2, D3
Výkon zařízení	kW	22	12	15	23	24	34
Spotřeba paliva	kg/h	8,1	4,4	5,1	5,7	5,9	8,0
Teplota spalin	°C	240	180	210	190	260	310
Obsah O ₂ v komíně	%	11,3	16,6	16,0	10,3	9,8	6,8
CO	mg/kg	200 000	59 000	57 000	86 000 ± 8 000	7 600 ± 500	2 800 ± 1 800
NO _x ^a	mg/kg	1 500	2 600	2 600	1 700 ± 1100	3 900 ± 100	2 900 ± 300
SO ₂	mg/kg	7 500	6 400	7 000	7 800 ± 800	9 000 ± 200	8 000 ± 900
TOC	mg/kg	63 000	12 000	11 000	2 000 ± 50	160 ± 50	73 ± 38
TZL	mg/kg	38 000	10 000	10 000	6 100 ± 1 200	880 ± 70	350 ± 50
PCB ^b	ng/kg	- ^f	- ^f	- ^f	110 ± 10	33 ± 9	31 ± 10
PAH ^c	mg/kg	87 000	11 000	20 000	38 000 ± 490	210 ± 120	510 ± 310
PCB ^d	ng/kg	29	28	26	26 ± 3	8,4 ± 1,0	11 ± 3
I-TEQ PCB	pg/kg	24	23	17	15 ± 1	4,4 ± 1,0	5,0 ± 1,0
PCDD/F ^e	ng/kg	220	49	47	58 ± 9	6,5 ± 2,0	1,9 ± 0,1
I-TEQ PCDD/F	pg/kg	630	570	350	310 ± 30	73 ± 28	69 ± 13

^a - NO_x vyjádřené jako NO₂; ^b - tetra až hexa chlorbenzeny; ^c - suma 10 PAU (Fluoranten, Pyren, Benzo(a)antracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranten, Benzo(k)fluoranten, Benzo(a)pyren, Benzo(g,h,i)perlen, Dibenzo(a,h)antracen, Indeno(1,2,3-cd)pyren;

^d - suma 14 PCB (PCB81, PCB77, PCB126, PCB169, PCB123, PCB118, PCB114, PCB105, PCB167, PCB156, PCB157, PCB189, PCB170); ^e - suma tetra až okta CDD/F; ^f - nestanoveny

regulací, která periodicky zapíná a vypíná chod podavače. U provedených experimentů bylo použito nastavení 12 s zapnuto a 20 s vypnuto. Emise znečišťujících látek tuto periodicitu kopírují, avšak v relativně krátkých časových úsecích.

Zařízení D, podobně jako zařízení B, není příliš závislé na periodicitě přikládání paliva. Palivo je přiloženo do zásobníku, který je umístěn uvnitř kotle. V zásobníku dochází za omezeného přístupu vzduchu ke zplynění paliva. Vzniklý plyn je veden přes hořák do tepelně izolované spalovací komory.

Spalovací zařízení uvedená v tabulce 2 jsou seřazena od „nejhorších“ po „nejlepší“ z hlediska produkce znečišťujících látek. EF CO jednoznačně ukazují rozdíly mezi spalovacími zařízeními ($A \gg B \gg C \approx D$). Podobné seřazení je patrné také ze srovnání EF TOC, TZL, PAU, PCB, I-TEQ PCB, PCDD/F i I-TEQ PCDD/F.

Pro EF NO_x je trend opačný, modernější kotle (C a D) vykazují vyšší EF než kotle staršího typu (A a B). Tento fakt je zřejmě dán vznikem termických NO_x vznikajících oxidací vzdušného dusíku při vyšších teplotách v ohništi kotle.

Porovnání potvrzuje, že na moderně konstruovaných kotlích (C a D) je možné stejné palivo spálit efektivněji a s významně nižším množstvím produktů nedokonalého spalování než na kotlích starších konstrukcí (A a B). Z tohoto srovnání pro spalování hnědého uhlí nejlépe vychází zařízení D, pracující na principu zplynění paliva a následného spalování vzniklého plynu.

Všechny zde prezentované EF I-TEQ PCDD/F (69–630 pg/kg) jsou ve srovnání s EF používanými pro roční bilanci výrazně nižší (pro hnědé uhlí je používán EF 6 000 pg/kg) [5]. Nízké EF PCDD/F byly dány zřejmě nízkým obsahem chloru v palivu (40 mg/kg). Použité hnědé uhlí je ovšem nejčastěji použitým palivem pro spalování v malých zdrojích, domníváme se proto, že je palivem reprezentativním pro stanovení daného emisního faktoru.

Spalování uhlí v moderních typech spalovacích zařízení (C a D) bylo doprovázeno, ve srovnání se starými konstrukcemi kotlů (A a B), významným snížením produkce všech

sledovaných znečišťujících látek kromě NO_x . Z výsledků je patrné, že výměnou starých spalovacích zařízení za moderní, je možné docílit značného zlepšení kvality ovzduší. Avšak pořizovací cena moderních zařízení je tři až pětinašobně vyšší než starých.

Poděkování

Tato práce byla podporována Ministerstvem životního prostředí České republiky – projekt č. SP/1a2/116/07 Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory a Grantovou agenturou České republiky – projekt č. 101/06/P262. Zpřesnění metodiky stanovení emisních faktorů pro malé zdroje spalující tuhá paliva.

Literatura

- [1] Změna skladby vytápění bytů URL:<<http://www.chmu.cz/uoco/isko/groc/gr07cz/gif/oI4em.gif>> [cit. 6. října 2009]
- [2] Národní program snižování emisí České republiky URL:<[http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_program_snizovani_emisi_cr/\\$FILE/OOO-NPSE_CR-20081003.pdf](http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_program_snizovani_emisi_cr/$FILE/OOO-NPSE_CR-20081003.pdf)> [cit. 6. října 2009]
- [3] Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2007, URL:<<http://www.chmu.cz/uoco/isko/groc/gr07cz/obsah.html>> [cit. 6. října 2009]
- [4] HORÁK J., HOPAN F., KRPEC K., DEJ M., KUBAČKA M., PEKÁREK V., ŠYC M., OCELKA T., TOMŠEJ T., MACHÁLEK P.: Determination of emission factor for combusting solid fuels in residential combustion appliances., *Organohalogen Compounds*. 2008 70:2470.
- [5] HORÁK J., HOPAN F., KRPEC K., DEJ M., MACHÁLEK P., PEKÁREK V., ŠYC M., OCELKA T., TOMŠEJ T.: Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů znečišťování a jejich emisní faktory, *Časopis Ochrana ovzduší*, 2008, (č. 5-6), s. 38-41, ISSN 1211-0337.

Velká kronika o hnědém uhlí



Křest publikace „VELKÁ KRONIKA O HNĚDÉM UHLÍ“ autorů Ing. Václava Valáška a Dr. Ing. Lubomíra Chytky se konal dne 19. 9. 2009 u příležitosti oslav 90. výročí založení Střední průmyslové školy v Duchcově. Křtu se zúčastnila řada významných hostů. Kromě zástupců těžebních společností nechyběl Ing. Ivo Pěgřímek – předseda Českého báňského úřadu v Praze, Ing. Pavel Musil – předseda Obvodního báňského úřadu v Mostě, prof. Ing. Vladimír Slivka, CSs. – děkan Hornicko-geologické fakulty VŠB TU Ostrava, ředitelka SPŠ Duchcov Ing. Jana Poláková a starostové měst Duchcov a Osek. Vlastní křest kroniky provedl předseda ČSSD Ing. Jiří Paroubek. Setkání všech přítomných pak zpříjemnila svým proslavem ředitelka Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí a.s. Ing. Marcela Šafářová, Ph.D. V rámci křtu se uskutečnila prohlídka Státního zámku Duchcov a rovněž byla položena kytice k pomníku obětem katastrofy na dole Nelson III v Oseku.

(Ing. Yveta Winklerová)