

MATEMATICKÝ MODEL PRODUKČIE OXIDOV DUSÍKA PRI SPALOVANÍ DENDROMASY U KOTLOV MALÝCH VÝKONOV

Marcel Koško

TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra energetickej techniky, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice
email: marcel.kosko@tuke.sk

V príspevku je analyzovaný matematický model na stanovenie produkcie oxidov dusíka pri spaľovaní dendromasy pre kotly malých výkonov. Matematický model je vypracovaný na základe teórie dimenzionálnej analýzy a je založený na vybraných fyzikálnych veličinách, ktoré možno v prevádzke kotla kontinuálne merať.

Kľúčové slová: dimenzionálna analýza, matematický model, oxidy dusíka, spaľovanie, kotol, dendromasa

ÚVOD

V roštových a pyrolytických kúreniskách spaľovacích zariadení je proces spaľovania dendromasy sprevádzaný produkciou nežiaducich sprievodných látok, emisií pozostávajúcich z tuhých znečisťujúcich látok (TZL), oxidu uhoľnatého (CO), oxidov dusíka (NO_x) a organických látok označovaných ako celkový organický uhlík (TOC) [4].

Oxidy dusíka sú do ovzdušia emitované prirodzenou cestou (a to najmä vulkanickou a bakteriologickou činnosťou na Zemi a elektrickými výbojmi) a činnosťou človeka, spaľovaním palív za účelom výroby tepla a elektrickej energie, a taktiež aj spaľovacími motormi dopravných prostriedkov. Plynné oxidy dusíka sú taktiež jedným z významných znečisťovateľov ovzdušia z hľadiska kyslých dažďov a tvorby fotochemického smogu. Z plynných emisií, ktoré sú produktom spaľovacích procesov, zaujímajú významné postavenie nasledujúce oxidy dusíka: oxid dusný (N_2O), oxid dusnatý (NO), oxid dusitý (N_2O_3), oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusičný (N_2O_5). Zo všetkých oxidov dusíka sú najcharakteristickejšími znečisťujúcimi látkami NO a NO_2 , ktoré sú spravidla označované ako NO_x [1], [3], [5].

Dôvodom riešenia problematiky popisu produkcie oxidov dusíka je skutočnosť, že v súčasnosti existujúce modely pri spaľovaní dendromasy sú postavené veľmi komplikovane a využívajú hlavne „chemizmus“ premeny dreva pri jeho spaľovaní, bez uvažovania aj iných možných vplyvov. Preto sa aj v súčasnosti stále hľadajú možnosti aplikácie nových metód a postupov na popis produkcie oxidov dusíka, i iných polutantov, pri spaľovaní dendromasy. Vzhľadom na zložitosť exaktného popisu procesu tvorby oxidov dusíka, pri rôznych podmienkach jej spaľovania, nie je možné vypracovať jeden všeobecne platný model, ktorý by túto produkciu popísal pre rôzne typy kotlov, pre rôzne formy palív (kusové drevo, štiepka, piliny, brikety, pelety a pod.) a pre rôzne druhy dreva (dub, buk, hrab, smrek, borovica, jedľa a pod.).

Cieľom príspevku je predstaviť matematický model produkcie oxidov dusíka vypracovaný na báze teórie dimenzionálnej (rozmerovej) analýzy. Vytvorený model je založený na vybraných fyzikálnych veličinách, ktoré možno počas prevádzky spaľovacieho zariadenia kontinuálne merať. V modeli je pozornosť venovaná hlavne vplyvu *prevádzkových parametrov* na produkciu oxidov dusíka pri spaľovaní daného druhu dreva s konkrétnou výhrevnosťou, čo je zohľadnené výkonom kotla, výhrevnosťou paliva atď.

Pri stavbe matematického modelu bola využitá už spomínaná dimenzionálna analýza (DA). Pokiaľ nie je k dispozícii príslušná matematická formulácia skúmaného javu, je možné použiť dimenzionálnu analýzu pre rozbor podmienok podobnosti. Použitie dimenzionálnej analýzy si vyžaduje predbežný rozbor podstaty skúmaného javu. Pri jej aplikácii je najdôležitejšou fázou správny výber tých veličín, od ktorých sa predpokladá, že vo významnej miere ovplyvňujú proces spaľovania dreva a teda aj produkciu oxidov dusíka. Vynechanie niektorej zúčastnenej veličiny pri vyšetrowaní daného javu predstavuje závažnú chybu. Naopak, nie je chybou, ak do hľadania matematickej závislosti pomocou DA zavedieme také veličiny, ktoré na skúmaný jav nemajú žiadny vplyv, pretože z ďalšieho riešenia obvykle sami vypadnú. Pri hľadaní matematickej závislosti sa pracuje s rozmermi veličín ovplyvňujúcimi daný proces, nie so samotnými veličinami. Až následne sa pretransformuje výsledok rozmerov na zoskupenie samotných veličín do podoby kritérií podobnosti (bezrozmerových argumentov) π [2].

TVORBA OXIDOV DUSÍKA PRI SPALOVANÍ DENDROMASY

Obsah dusíka v dreve je rôzny a závisí hlavne od druhu dreveny. Priemerná hodnota obsahu dusíka v dreve ihličnatých drevín je cca $N = 0,03 \%$ a v dreve tvrdých listnatých drevín je to až $N = 0,15 \%$. Priemerné zastúpenie dusíka v kôre ihličnatých drevín je cca $N = 0,40 \%$ a v kôre listnatých drevín až $N = 0,72 \%$ [3], [5].

Oxidy dusíka sa v procese spaľovania vlhkého dreva a kôry v roštových kúreniskách tepelných agregátov tvoria len cestou nízko teplotnej oxidácie časti dusíka viazaného v palive. Ich produkcia je závislá od množstva dusíka nachádzajúceho sa v palive a od podielu transformujúceho sa palivového dusíka v palive na emisie. Skutočnosť, že obsah dusíka v dreve a kôre jednotlivých drevín nie je rovnaký, znamená, že nerovnaké budú i koncentrácie oxidov dusíka v spalinách z týchto drevín [3].

Metodika aplikovaná pri tvorbe modelu na popis produkcie NO_x zo spaľovania dendromasy, zahŕňa vzájomný vzťah medzi dusíkom obsiahnutým v dreve a oxidmi dusíka v spalinách iba prostredníctvom teploty spalín na výstupe z kotla. Predpokladá sa totiž, že táto teplota je v priamom súvisi s teplotou v ohnisku, ktorej trvalé meranie je v praktickej prevádzke pomerne problematické.

Pri samotnej tvorbe modelu nemusí byť typ dreveny a vplyv obsahu dusíka v tejto drevine zohľadnený priamo. Tento vplyv sa premietne v modeli prostredníctvom nameraných hodnôt vybraných veličín, tvoriacich model, in situ. Namerané oxidy dusíka odrážajú kvalitu i charakter príslušného spaľovacieho procesu, vplyv spaľovanej dreveny s jej príslušajúcim obsahom dusíka v dreve i kôre. Vplyv druhu spaľovaného dreva, a tým aj obsahu dusíka v palive, na samotnú produkciu oxidov dusíka sa prejavuje iba v získaných konštantách A , B v rovnici (9), ktoré vo vypracovanom modeli budú pre každý druh dreveny a jej výhrevnosť iné. Tieto konštanty je nutné získať pre príslušný druh spaľovanej dendromasy z experimentu.

Vypracovaný matematický model na stanovenie produkcie oxidov dusíka má všeobecnú platnosť, ale konštanty A a B , obsiahnuté v ňom, platia iba pre spaľované drevo s konkrétnou hodnotou obsahu dusíka v ňom a s jeho aktuálnou výhrevnosťou. Preto pri spaľovaní inej dreveny, ako sa spaľovala počas garančných meraní u analyzovaného kotla VERNER v tomto príspevku (suché bukové drevo o dĺžke polena 34 cm), je potrebné vo vypracovanom modeli nanovo stanoviť konštanty A a B vyskytujúce sa v rovnici (9).

Matematický model bol vypracovaný pre kotol typu VERNER V210 o výkone 20 kW a bol overený aj pre kotol obdobnej konštrukcie s nižším výkonom (VERNER V140 o výkone 14 kW). Tieto kotly od firmy VERNER (obr. 1) sú teplovodné kotly na drevo a sú určené pre úsporné, komfortné a ekologicky šetrné vykurovanie rodinných domov, bytových jednotiek prevádzok a obdobných objektov s tepelnou stratou do 20 kW (resp. do 14 kW). Obidva kotly sú založené na princípe dvojestupňového spaľovania, pri ktorom dochádza k splyňovaniu paliva s následným horením vznikajúcich plynov. Technické parametre oboch kotlov sú uvedené v tab. 1 [7].



Obr. 1 Kotol na kusové drevo VERNER V210 [7].

Tab. 1 Parametre kotlov VERNER [7].

KOTOL	V140	V210	KOTOL	V140	V210
Menovitý výkon (kW)	14	20	Minimálna teplota vratnej vody do kotla (°C)	55	55
Účinnosť (%)	90	90	Teplota spalín na výstupe (°C)	150	155
Regulovateľnosť kontinuálnou prevádzkou (kW)	7 - 14	10 - 20	Výhrevnosť (MJ·kg ⁻¹)	14,52	15,45
Regulovateľnosť odstávkovou prevádzkou (kW)	2 - 7	3 - 10	Hmotnostný prietok spalín (kg·s ⁻¹)	0,01	0,015
Celková hmotnosť (kg)	330	370	Minimálny prevádzkový ťah komína (Pa)	10	10
Výška (bez krytu dymovodu) (mm)	1230	1230	Emisná trieda kotla	3	3
Šírka (mm)	580	580	Rozsah regulácie teploty výstupnej vody (°C)	60 - 90	60 - 90
Hĺbka (mm)	825	925	Záručné palivo (suché drevo)	priemer: do 15 cm, dĺžka: do 35 cm	
Priemer odťahového hrdla spalín (mm)	160	160	Ostatné palivo	drevné brikety, piliny, suchá drevná štiepka	
Objem prikładacej komory (l)	55	75	Maximálna hladina hluku (dB)	55	55
Spotreba paliva pri menovitom výkone (kg·h ⁻¹)	3,6 - 3,8	4,2 - 5,7			
Vodný objem (l)	30	32			

MATEMATICKÝ MODEL POPISUJÚCI TVORBU OXIDOV DUSÍKA

Medzi relevantné veličiny ovplyvňujúce produkciu oxidov dusíka pri spaľovaní dreva na analyzovanom spaľovacom zariadení boli na základe poznatkov z odbornej literatúry vybrané tie veličiny, ktoré proces spaľovania sprevádzajú a sú u prevádzkovateľa daného zariadenia merateľné. Ide o nasledujúce veličiny, ktoré pre aplikáciu dimenzionálnej analýzy musia byť vyjadrené v sústave základných jednotiek:

- výkon kotla P_k ($W \equiv \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$),
- množstvo spaľovacieho vzduchu Q_{vz} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- výhrevnosť paliva Q_u ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \equiv \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),
- teplota spalín na konci kotla T_{sk} (K),
- teplota spaľovacieho vzduchu T_{vz} (K),
- oxidy dusíka NO_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

V zmysle riešenia podľa DA [2] získavame dva komplexné bezrozmerné argumenty v tvare

$$\pi_1 = \frac{Q_{vz} \cdot Q_u \cdot NO_x}{P_k} \quad (1)$$

$$\pi_2 = \frac{T_{sk}}{T_{vz}} \quad (2)$$

Všeobecný bezrozmerný popis funkcie vyjadrujúcej tvorbu oxidov dusíka pri spaľovaní dreva možno uviesť v tvare

$$\psi(\pi_1, \pi_2) = 0 \quad (3)$$

Bezrozmerný argument π_1 obsahuje veličinu NO_x , preto tento argument možno vyjadriť ako funkciu argumentu π_2

$$\pi_1 = \phi(\pi_2) \quad (4)$$

Funkcia (4) bude znázornená jednoparametrickou sústavou kriviek. Jej tvar sa určí tak, že sa vypočíta hodnota π_2 z hodnôt získaných meraním (tab. 2) a zakreslí sa ako nezávisle premenná hodnota. Argument π_1 , a tým aj NO_x , sa následne zobrazí ako funkcia závisle premenná funkcie π_2 .

Konkrétne vyjadrenie rovnice (4) možno predpokladať napr. v tvare mocninovej funkcie

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^B \quad (5)$$

ktorú logaritmovaním pretransformujeme na rovnicu priamky

$$\log \pi_1 = \log A + B \cdot \log \pi_2 \quad (6)$$

Výpočet lokujúcej konštanty A vo vzťahu (6), udávajúcej vzdialenosť priesečníka regresnej priamky na súradnici π_1 od nuly, a regresného súčiniteľa B , udávajúceho smernicu regresnej priamky, možno uskutočniť na základe metódy najmenších štvorcov a tiež priamo využitím programu Microsoft Excel.

VÝSLEDKY Z APLIKÁCIE VYPRACOVANÉHO MODELU

Pre účel stavby matematického modelu a jeho overenia boli firmou VERNER poskytnuté údaje o jednotlivých fyzikálnych veličinách (tab. 2). Ide o priemerné hodnoty získané z kontinuálnych meraní pri dvoch prevádzkových stavoch kotla. Dvakrát sa uskutočnilo meranie pri nominálnom výkone (cca 20 000 W); raz pri cca polovičnom výkone. Merania realizovala externá firma (Strojirenský zkušební ústav, s.p. Brno).

Tab. 2 Namerané hodnoty príslušných veličín a vypočítané hodnoty NO_x podľa vzťahu (10) pre kotol V210.

P_k (W)	Q_{vz} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_u ($J \cdot kg^{-1}$)	T_{sk} (K)	T_{vz} (K)	$NO_{x \text{ nam}}$ ($kg \cdot m^{-3}$)	$NO_{x \text{ vyp}}$ ($kg \cdot m^{-3}$)	odchýlka (%)
20050	0,0097	15450000	394,75	296,65	0,00024235	0,00022490	7,20
20010	0,0101	15450000	397,15	296,85	0,00020538	0,00022026	-7,24
10870	0,0057	15450000	365,15	296,85	0,00015814	0,00015890	-0,48

V tab. 3 sú uvedené vypočítané hodnoty bezrozmerných argumentov π_1 , π_2 podľa vzťahov (1) a (2) a z nich sú určené logaritmy potrebné pre analytický postup výpočtu regresného súčiniteľa a lokujúcej konštanty.

Z nameraných hodnôt relevantných veličín možno zobrazíť skutočný priebeh funkcie $\log \pi_1 = \phi(\log \pi_2)$ ako aj priebeh závislosti samotných bezrozmerných argumentov priamo v logaritmickej súradniciach.

Zo závislosti vyjadrenej v logaritmickej súradniciach vyplýva priamo lokujúca konštanty A a regresný koeficient B . Ich hodnoty sú $A = 0,00063236$, $B = 3,4190$.

Tab. 3 Hodnoty bezrozmerných argumentov pre lineárnu regresiu.

π_2 (1)	π_1 (1)	$\log \pi_1$ (1)	$\log \pi_2$ (1)	$\log \pi_1 \cdot \log \pi_2$ (1)	$\log^2 \pi_2$ (1)
1,3307E+00	1,8089E-03	-2,7424	0,1241	-0,3403	0,0154
1,3379E+00	1,5952E-03	-2,7972	0,1264	-0,3536	0,0160
1,2301E+00	1,2775E-03	-2,8936	0,0899	-0,2602	0,0081
		-8,4332	0,3404	-0,9541	0,0395
		$\sum y$	$\sum x$	$\sum x \cdot y$	$\sum x^2$

Takto stanovené konštanty vo vypracovanom modeli platia iba pre spaľovanie suchého bukového dreva s výhrevnosťou $15,45 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. V prípade spaľovania dreva s inou výhrevnosťou by boli počas meraní získané iné hodnoty jednotlivých veličín vystupujúcich v modeli. Získali by sa aj iné hodnoty bezrozmerných argumentov π_1 a π_2 a produkciu oxidov dusíka by popisoval vzťah (9), v ktorom by bola podchytená zmena druhu spaľovaného paliva i produkcia oxidov dusíka prostredníctvom nových hodnôt lokujúcej konštanty A i regresného súčiniteľa B .

Ak sa nezrealizuje experiment za účelom získania nových konštant A a B pri spaľovaní iného druhu či kvality dreva, ale použijú sa ich pôvodné hodnoty, je treba očakávať významnejšiu odchýlku vo vyjadrení NO_x podľa vpracovaného modelu, ako je tomu v skutočnosti. Aj takýto prípad aplikácie modelu bude v článku analyzovaný.

Na základe vzťahu (5) možno pre analyzovaný kotol popísať tvorbu oxidov dusíka pri spaľovaní dreva modelom vytvoreným pomocou rozmerovej analýzy závislosťou relevantných rozmerových veličín nasledovne

$$\frac{Q_{vz} \cdot Q_u \cdot \text{NO}_x}{P_k} = A \cdot \left(\frac{T_{sk}}{T_{vz}} \right)^B \quad (1) \quad (7)$$

Funkčná závislosť produkcie NO_x na vybraných veličinách vyjadrená zo vzťahu (7) bude v tvare

$$\text{NO}_x = A \cdot P_k \cdot T_{sk}^B \cdot Q_{vz}^{-1} \cdot Q_u^{-1} \cdot T_{vz}^{-B} \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (8)$$

Doplnením konkrétnych hodnôt regresného súčiniteľa a lokujúcej konštanty do výrazu (8) získame

$$\text{NO}_x = 63236 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{P_k}{Q_{vz} \cdot Q_u} \right) \cdot \left(\frac{T_{sk}}{T_{vz}} \right)^{3,4190} \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (9)$$

resp.

$$\text{NO}_x = C \cdot \left(\frac{P_k}{Q_{vz} \cdot Q_u} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{sk}}{T_{vz}} \right)^n \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (10)$$

kde jednotlivé konštanty predstavujú hodnoty $C = 63236 \cdot 10^{-8}$, $m = 1,0$, $n = 3,4190$.

Vzťah (10) predstavuje matematický model produkcie NO_x pri spaľovaní dreva u kotlov malých výkonov rovnakej, príp. geometricky podobnej, konštrukcie s konštrukciou kotlov firmy VERNER.

OVERENIE VYPRACOVANÉHO MATEMATICKÉHO MODELU PRE KOTOL VERNER V140

Vypracovaný model produkcie oxidov dusíka bol overovaný aj pre kotol nižšieho výkonu - typ VERNER V140. Aj pri tomto kotle boli získané stredné hodnoty nameraných veličín potrebných do vzťahu (10) pri dvoch menovitých výkonoch a pri zhruba polovičnom výkone kotla od spoločnosti Strojírenský zkušební ústav, s. p. Brno. Overenie modelu prebiehalo prakticky dosadením jednotlivých veličín platných pre kotol V140 do vzťahu (10) pri dodržaní rovnakých hodnôt konštant C , m , n ako v prípade kotla V210. Namerané a vypočítané hodnoty oxidov dusíka pre kotol s nižším výkonom sú v tab. 4.

Tab. 4 Namerané hodnoty príslušných veličín a vypočítané hodnoty NO_x podľa vzťahu (10) pre kotol V140.

P_k	Q_{vz}	Q_u	T_{sk}	T_{vz}	$\text{NO}_{x \text{ nam}}$	$\text{NO}_{x \text{ vyp}}$	odchýlka
(W)	($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(K)	(K)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	(%)
13210	0,0065	14520000	384,45	295,55	0,0002115	0,0002183	-3,21
13530	0,0067	14520000	386,55	297,25	0,0002074	0,0002157	-4,02
6930	0,0038	14520000	376,25	298,15	0,0001930	0,0001780	7,79

Rozdiel medzi nameranými a vypočítanými hodnotami podľa uvedeného vzťahu pre kotol VERNER V210 (tab. 4) možno zdôvodniť tým, že pri výbere relevantných veličín sa s určitou nezhľadnili všetky vplyvy, od ktorých oxidy dusíka pri spaľovaní dreva závisia. Priorita pri stavbe modelu však bola zameraná na veličiny jednoducho merateľné, preto je odôvodnené očakávať významnejšiu odchýlku medzi nameranými veličinami oxidov dusíka a vypočítanými podľa vypracovaného vzťahu (10).

Experiment použiť rovnaký model na stanovenie NO_x pre kotol s nižším výkonom ukázal, že model použiť možno. Odchýlka vo výsledkoch u kotla V140 je dokonca menšia, ako u kotla s výkonom vyšším (V210). Je však treba poznamenať, že u spaľovaného dreva v kotle V140 nebol známy dôvod zníženej výhrevnosti rovnakého typu spaľovaného dreva (obsah dusíka v dreve, nepomer spaľovanej kôry a samotnej drevnej časti, iná vlhkosť dreva, drevo z inej lokality, a pod.), preto nemožno kvalifikovane zdôvodniť priaznivý výsledok v získaných hodnotách oxidov dusíka pomocou modelu v prípade kotla s nižším výkonom. Očakávalo sa však, že odchýlka vo výsledku bude pre tento kotol väčšia, ako je to v prípade kotla s vyšším výkonom, pre ktorý bol model vypracovaný.

ZÁVER

Základným predpokladom pre aplikáciu tohto modelu na stanovenie aktuálnej hodnoty NO_x je poznanie aktuálnych hodnôt všetkých veličín vystupujúcich v matematickom modeli pre daný typ kotla. Model môže slúžiť na kontrolu spaľovacieho procesu online, príp. orientačne pre užívateľa kotla. Vypracovaný matematický model pomocou dimenzionálnej analýzy potvrdil možnosť využitia tejto metódy na stanovenie hodnoty produkovaných oxidov dusíka pri spaľovaní dreva v zariadeniach malých výkonov. Z tab. 2 a 4 vyplýva, že odchýlka v stanovení produkcie oxidov dusíka z priamych meraní na kotle V210 a pomocou matematického modelu sa pohybuje v rozmedzí od -7,24 % do 7,20 % a na kotle V140 od -4,02 % do 7,79 %. Zistené odchýlky medzi nameranými a vypočítanými hodnotami je možné zdôvodniť aj tým, že pri výbere relevantných veličín ovplyvňujúcich proces spaľovania dreva sa s určitou nezhľadnili všetky vplyvy, od ktorých tvorba NO_x závisí.

Nevyhnutnosťou pri stavbe matematického modelu využívajúceho dimenzionálnu analýzu je dôkladne poznať fyzikálnu podstatu skúmaného javu a zohľadniť v ňom všetky relevantné veličiny, od ktorých daný jav závisí. Pri spaľovaní dreva by mala byť medzi relevantné veličiny zaradená, okrem teploty spalín na konci kotla, napr. aj teplota plameňa. Trvalé meranie teploty plameňa v zóne spaľovania je však v praktickej prevádzke problematické, preto sa upustilo od zaradenia tejto relevantnej veličiny do vytvárania matematického modelu. Predpokladalo sa, že táto teplota súvisí s konečnou teplotou spalín. Nezaradenie teploty plameňa medzi relevantné veličiny je istou chybou pri popise produkcie oxidov dusíka a v zásadnej miere sa tento nedostatok podieľa na zistenej odchýlke produkovaných oxidov dusíka podľa vypracovaného modelu, vzťah (10), a z priameho merania.

Príspevok vznikol v rámci riešenia čiastkového problému grantového projektu VEGA č.1/0006/11 a KEGA 045-015TUKE-4/2010.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] BRANC, M. - BOJKO, M.: A definition of the mathematical model of combustion process in the stove. Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics, 2009, Vol. 3, No. 1/2009, s. 1-5, ISSN 1802-9388.
- [2] ČARNOGURSKÁ, M. (2000): Základy matematického a fyzikálneho modelovania v mechanike tekutín a termodynamike. Viena, Košice, 176 s. ISBN 80-7099-344-8.
- [3] DZURENDA, L. (2005): Spaľovanie dreva a kôry: Príručka. Vydavateľstvo TU vo Zvolene, Zvolen, 124 s. ISBN 80-228-1555-1.
- [4] JANDAČKA, J. (2008): Ekologické aspekty zámény fosílnych palív za biomasu. Jozef Bulejčík, Žilina, 226 s. ISBN 978-80-969595-5-6.
- [5] KOŠKO, M. Oxidy dusíka vznikajúce pri spaľovaní dendromasy. In Plynár-Vodár-Kúrenár+Klimatizácia, 2011, roč. 9, č. 3, s. 18-21, ISSN 1335-9614.
- [6] NOSEK, R. - JURKCHOVÁ, J. - PAPUČÍK, Š. - JANDAČKA, J.: Influence of fuel supply to in small capacity boiler on efficiency and pollutant emissions, Experimental Fluid Mechanics 2010, Liberec 24-26.11.2010, str. 458-463, ISBN 978-80-7372-670-6.

- [7] VERNER a. s. Kotly na kusové dřevo. Firemný materiál. [cit. 2011-10-10]. Dostupné na internete: <<http://www.kotle-verner.cz/produkty/kotle-na-kusove-drevo>>.