



## STANOVENIE HODNOTY EMISNEJ VELIČINY $c_{\max} \text{NO}_x$ Z PROCESU SPAĽOVANIA VHLKÉHO BUKOVÉHO DREVA V ROŠTOVOM KÚRENISKU - TECHNICKÝM VÝPOČTOM

Ladislav Dzurenda

### Abstract

*In this paper is specified emission variable  $c_{\max} \text{NO}_x$  in combustion products from process of combustion of wet beech wood in fire chamber boiler KD 1160. By technical calculation in compliance with measures § 3, subsection 2, sort a) regulations MZP SR 408 /2003. Collection of Laws is specified the highest concentration of nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  expression form  $\text{NO}_2$  in arid combustion products from process of beech wood burning.*

*Calculation of emission variable consists of calculations of maximal variable concentration  $\text{NO}_2$  in arid combustion products and accuracy rating of objective technical calculation. Emission variable  $\text{NO}_x$  for burning of beech wood by technical calculation is:*

$$c_{\max} \text{NO}_x = 348 \text{ mg} \cdot \text{m}_{\text{n},11\%}^{-3}$$

**Key words:** *combustion, wood, beech, technical calculation, emission variable  $c_{\max} \text{NO}_x$*

### 1. ÚVOD

Drevná hmota je ako palivo charakterizovaná stredne vysokou výhrevnosťou, vysokým podielom prchavej horľaviny a nízkym obsahom popola. Patrí medzi prírodné obnoviteľné energetické zdroje. Pri charakterizovaní a hodnotení palív používaných v priemysle sa dnes okrem energetického a ekonomického hľadiska čoraz viac presadzuje i hodnotenie palív z environmentálnych aspektov. Jednou z neželateľných znečisťujúcich látok v spalinách zo spaľovania palivového dreva sú oxidy dusíka  $\text{NO}_x$ .

Prevádzkovatelia stredných a veľkých zdrojov znečisťovania ovzdušia sú podľa § 19, odst.1, písm.b), zákona č.478/2002 Z.z. povinný zisťovať a preukazovať dodržiavanie emisných limitov. Jedným z možných spôsobov zisťovania (monitorovania) hodnôt emisných veličín pre účely preukazovania údajov o dodržiavaní emisných limitov podľa § 3 ods. 2 písm. a) vyhlášky MŽP SR č. 408/2003 Z.z. je technický výpočet.

Cieľom tohto príspevku je formou technického výpočtu stanovenie hodnoty emisnej veličiny  $c_{\max} \text{NO}_x$  – najvyššej hodnoty koncentrácie oxidov dusíka  $\text{NO}_x$  v spalinách, vyjadrené formou  $\text{NO}_2$  v suchých spalinách, z procesu spaľovania bukového dreva s vlhkosťou nad  $W^t = 37,5 \%$  v roštovom kúrenisku teplovodného kotla KD – 1160.

Táto práca bola vypracovaná v rámci riešenia grantového projektu VEGA – SR č. 1/1335/04 ako výsledok práce autora za výraznej pomoci agentúry VEGA - SR.

## 2. PODMIENKY SPAĽOVANIA VLHKÉHO BUKOVÉHO DREVA V KÚRENISKU KOTLA KD – 1160

V kúrenisku teplovodného kotla sa spaľuje vlhká buková drevná hmota vo forme energetickej štiepky. Absolútna vlhkosť spaľovanej bukovej štiepky je  $w_a = 60 \div 80 \%$  ( $W^r = 0,375 \div 0,444 \text{ kg.kg}^{-1}$ ). Spaľovanie paliva na rošte kúreniska kotla KD 1160 je kontinuálne realizované v jednom režime pri prebytku vzduchu privádzaného do spaľovacieho priestoru kúreniska v rozpätí  $\lambda = 2,0 \div 2,5$ .

Technický výpočet hodnoty emisnej veličiny  $c_{max} NO_x$  - najvyššej koncentrácie oxidu dusičitého v spalinách zo spaľovania vlhkého bukového dreva je založený na nasledovných zákonitostiach a poznatkoch:

### Charakteristika paliva:

Suché bukové drevo, ako palivo je charakterizované stredne vysokou výhrevnosťou  $Q_n = 18,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , vysokým podielom prchavej horľaviny  $V^d = 85 \%$  a nízkym obsahom popola  $A^d \approx 1 \%$ . Chemické zloženie horľaviny dreva listnatých drevín a množstvo vzduchu na teoretické spálenie ( $\lambda=1$ ) 1 kg bukovej štiepky uvádza tabuľka č. 1.

**Tabuľka 1** Chemické zloženie horľaviny dreva listnatých drevín ( $W^r = 0 \%$ )

Palivo	Chemické zloženie horľaviny dreva listnatých drevín [ $\text{kg.kg}^{-1}$ ]					Teoretická spotreba vzduchu na dokonalé spálenie 1 kg suchého dreva ( $\lambda=1$ )
	$C^{daf}$	$H^{daf}$	$O^{daf}$	$S^{daf}$	$N^{daf}$	
Drevo	0,480	0,060	0,458	-	0,002	$V_{vz-T} = 4,390 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ $m_{vz-T} = 5,805 \text{ [kg.kg}^{-1}]$

Prítomnosť vody v drevnej hmote vplyva negatívne na výhrevnosť paliva a v procese horenia znižuje teplotu plameňa. Vplyv vlhkosti na výhrevnosť vlhkého dreva a kóry popisuje rovnica (Kollmann 1951):

$$Q_n = 18\,840 - 21\,353 \cdot W^r$$

kde:  $W^r$  - relatívna vlhkosť paliva [ $\text{kg.kg}^{-1}$ ].

Zastúpenie prvkov horľaviny bukového dreva v tabuľke č.1 možno označiť prívlastkom priemerné hodnoty. V odbornej literatúre (Perelygin 1965, Blažej a kol. 1973, Trnobranský 1976, Bučko-Osvald 1997, Ladomerský, J. a kol 2000) sú hodnoty obsahu elementárneho zloženia horľaviny palivového dreva uvádzané v intervale hodnôt:

$$C^{daf} = 0,487 \div 0,510 \text{ [kg.kg}^{-1}]$$

$$H^{daf} = 0,057 \div 0,063 \text{ [kg.kg}^{-1}]$$

$$O^{daf} = 0,442 \div 0,450 \text{ [kg.kg}^{-1}]$$

Drevná hmota sa radí k bezsírnyim palivám. Síra v drevnej hmote sa nenachádza. Podrobné kvalitatívne chemické analýzy ju uvádzajú v stopových množstvách (Perelygin 1965, Blažej a kol. 1973, Trnobranský 1976, Požgaj a kol. 1993, Bučko-Osvald 1997, Ladomerský, J. a kol. 2000).

Dusík sa vo fytohmase nachádza v akcesorických (sprievodných) zložkách fytohmasy, v makromolekulách: bielkovín (peptidická väzba -CO-NH-), nukleových kyselín (DNA, RNA), v chlorofyle, alkaloidoch, nukleotidoch a pyridinukleotidoch. Zastúpenie dusíka vo fytohmase v jednotlivých častiach stromu nie je rovnomerné. Obsah dusíka v bukovom dreve je  $N = 0,01 \div 0,23$  (Perelygin 1965, Mindaš – Stančíková 2004, Dzurenda 2005).

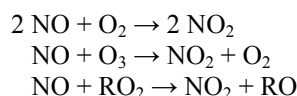
Vyššie zastúpenie dusíka je v bukovej kôre  $N = 0,32 \div 0,68 \%$  a listí  $N = 1,40 \div 2,80 \%$  (Blažej a kol. 1973, Požgaj. A kol. 1993, Mindaš – Stančíková 2004, Dzurenda – Banski 2004).

Rozbor obsahu dusíka v horlavine spaľovaného bukového dreva na jednoúčelovom analyzá-tore LECO FP 228 v Centrálnom lesníckom laboratóriu na Lesníckom výskumnom ústave vo Zvolene uvádza hodnotu:

$$N^{\text{daf}} = 0,0016 \pm 0,0002 \text{ [kg.kg}^{-1}\text{]}$$

#### Charakterizovanie procesu horenia paliva - mechanizmus vzniku oxidov dusíka

Prevažujúcou zložkou oxidov dusíka  $\text{NO}_x$  v spalinách z procesov spaľovania fosilných palív a dendromasy v kúreniskách tepelných generátorov je oxid dusnatý NO (cca 95 % z celkových  $\text{NO}_x$ ). V menšom množstve sa tvorí oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ , oxid dusný  $\text{N}_2\text{O}$ , oxid dusitý  $\text{N}_2\text{O}_3$  a oxid dusičitý  $\text{N}_2\text{O}_5$ . Keďže oxid dusnatý NO v atmosfére reaguje so vzdušným kyslíkom  $\text{O}_2$  na oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ , podľa reakcií:



v energetike sa zaužívalo vyjadrovanie koncentrácie oxidov dusíka v spalinách formou oxidu dusičitého  $\text{NO}_2$ .

Oxid dusnatý v procesoch spaľovania fosilných palív a dendromasy ako z molekulárneho dusíka, ktorý je do kúreniska privádzaný spaľovacím vzduchom, tak i z atomárneho dusíka, ktorý je chemicky viazaný v organických zlúčeninách paliva. Tvorba oxidov dusíka v procese spaľovania palív je závislá na podmienkach spaľovania paliva. Doposiaľ sú známe tri mechanizmy jeho vzniku, označované ako:

- **Termické NO** sa tvoria v procese horenia paliva oxidáciou dusíka zo spaľovacieho vzduchu pri teplotách  $t > 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zeldovič 1947).
- **Palivové NO** vznikajú oxidáciou časti dusíka chemicky viazaného v palive s atomárnym kyslíkom (pri teplotách  $t < 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Podiel transformujúceho sa palivového dusíka z fyto-masy, na emisie NO a  $\text{NO}_2$ , je  $X_N = 0,4 \div 0,6$ . (Nussbaumer 1991, Guzenda – Swigon 1997, Dzurenda 2003).
- **Okamžité NO** sú produktom oxidácie ľahko viazaného dusíka v palive, ktorá prebieha v medznej vrstve čela plameňa za účasti uhlíkovodíkových radikálov (pri teplotách  $t > 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Fenimore 1971).

Základnou informáciou charakterizujúcou podmienky procesu horenia paliva pre vznik oxidov dusíka v kúrenisku tepelného generátora je teplota plameňa. Závislosť teploty plameňa na vlastnostiach paliva a podmienkach spaľovania paliva v kúrenisku kotla uvádza rovnica (Janský 1954, Trnobranský 1976, Setnička 1981):

$$t_{\text{sp}} = \frac{Q_n \cdot \eta_{\text{sp}} \cdot (1 - \varepsilon) + \lambda \cdot m_{\text{vz-T}} \cdot c_{\text{vz-p}} \cdot t_{\text{vz}}}{m_{\text{sps}} \cdot c_{\text{sps}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}} \text{ [}^\circ\text{C]}]$$

$$t_{\text{sp}} = \frac{Q_n \cdot \eta_{\text{k}} \cdot (1 - \varepsilon) + \lambda \cdot m_{\text{vz-T}} \cdot c_{\text{vz-p}} \cdot t_{\text{vz}}}{\left[ 3,666 \cdot C^{\text{daf}} + 0,77 \cdot m_{\text{vz-T}} + (\lambda - 1) \cdot m_{\text{vz-T}} \right] \cdot [1 - A - W^r] \cdot 1,1 + \left[ 9 \cdot H \right] \cdot [1 - A - W^r] + W^r} \cdot 1,95_{\text{vz}} \text{ [}^\circ\text{C]}]$$

kde:  $Q_n$  – výhrevnosť paliva [ $\text{kJ.kg}^{-1}$ ],  $\eta_{\text{k}}$  – účinnosť kúreniska [-],  $\varepsilon$  – súčiniteľ vysálaného tepla plameňom do stien kúreniska [-],  $t_{\text{vz}}$  – teplota vzduchu privádzaného do

kúreniska [ $^{\circ}C$ ],  $m_{sp-w}$  – hmotnosť vlhkých spalín z 1 kg paliva [kg],  $c_{p-w}$  – špecifická tepelná kapacita vlhkých spalín [ $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ],  $m_{sp-s}$  – hmotnosť suchých spalín z 1 kg paliva [kg],  $c_{sp-s}$  – špecifická tepelná kapacita suchých spalín [ $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ],  $m_{H_2O}$  – hmotnosť vodnej pary z 1 kg paliva [kg],  $c_{H_2O}$  – špecifická tepelná kapacita vodnej pary [ $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ],  $C^{daf}$  – hmotnostný podiel uhlíka v horľavine bukového dreva [ $kg.kg^{-1}$ ],  $H^h$  – hmotnostný podiel vodíka v horľavine bukového dreva [ $kg.kg^{-1}$ ],  $A^d$  – obsah popola v palive [ $kg.kg^{-1}$ ],  $W^r$  – relatívna vlhkosť paliva [ $kg.kg^{-1}$ ],  $\lambda$  – prebytok spaľovacieho vzduchu [-],  $m_{vz-T}$  – teoretická spotreba vzduchu na dokonalé spaľenie 1 kg paliva [kg]

Pri akceptovaní Kollmannovej rovnice zohľadňujúcej vplyvu vlhkosti na výhrevnosť vlhkého dreva:  $Q_n = 18\,840 - 21\,353 * W^r$  a predpoklade, že v procese spaľovania bukového dreva nevznikajú straty nedopaľom ( $S_C = 0$ ) účinnosť kúreniska je ( $\eta_K = 1$ ), súčiniteľ vysálaného tepla do stien kúreniska  $\varepsilon = 0$ , špecifická tepelná kapacita suchých spalín  $c_{sp-s} = 1,1 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ , špecifická tepelná kapacita vodnej pary  $c_{H_2O} = 1,95 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ , teplota vzduchu privádzaného do kúreniska je  $t_{vz} = 20^{\circ}C$ , maximálna teplota plameňa, pri uvedených podmienkach spaľovania vlhkého smrekového dreva  $W^r \geq 0,375$  a prebytku vzduchu  $\lambda \geq 2,0$  je:

$$t_{sp} = \frac{(18840 - 21353 * W^r) + \lambda * 116,68}{\left[3,666 * C^{daf} + 0,77 * m_{vz-T} + (\lambda - 1) * m_{vz-T}\right] * [1 - A - W^r] * 1,1 + \left[9 * H\right] * [1 - A - W^r] + W^r * 1,95_{vz}} \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{sp} \leq \frac{(18840 - 21353 * 0,375) + 2 * 116,68}{\left[6,23 + (2 - 1) * 5,805\right] * [1 - 0,01 - 0,375] * 1,1 + \left[0,55 * [1 - 0,01 - 0,375]\right] + \left[0,375\right] * 1,95}$$

$$t_{sp} \leq 1042,5^{\circ}C$$

Z vykonanej analýzy podmienok spaľovania vlhkého bukového dreva  $W^r \geq 0,375$  v roštovom kúrenisku tepelného generátora pri prebytku spaľovacieho vzduchu  $\lambda = 2,0$  vyplýva, že sa nevytvárajú podmienky pre tvorbu oxidov dusíka cestou vysokoteplotnej oxidácie dusíka (teplota plameňa  $t_{sp} \leq 1300^{\circ}C$ ), ako i tvorbu okamžitých oxidov dusíka (teplota plameňa  $t_{sp} \leq 1600^{\circ}C$ ). Oxidy dusíka v procese spaľovania vlhkého bukového dreva v kúrenisku tepelného generátora sa tvoria len cestou nízkooteplotnej oxidácie časti viazaného dusíka v palive. Ich produkcia je závislá od množstva dusíka nachádzajúceho sa v palive a podiele transformujúceho sa palivového dusíka v palive na emisie. Pri výpočte najvyššej koncentrácie oxidov dusíka v suchých spalinách bude aplikovaná hodnota transformujúceho sa podielu palivového dusíka na emisie:  $X_N = 0,6$ .

### 3. VÝPOČET NAJVIŠŠEJ KONCENTRÁCIE $c_{max} NO_2$ V SUCHÝCH SPALINÁCH Z PROCESU SPAĽOVANIA VĽHKÉHO BUKOVÉHO DREVA.

Najvyššiu hodnotu koncentrácie oxidov dusíka  $NO_x$  vyjadrenú formou  $NO_2$  v suchých spalinách z procesu spaľovania vlhkého bukového dreva pri prebytku spaľovacieho vzduchu  $\lambda = 2,1$  (obsah kyslíka v spalinách  $O_2 = 11\%$ ) uvádzajú rovnice:

$$c_{max} NO_2 = \frac{m_{NO_2}^{max}}{V_{spnm}^{min}} \quad [kg.m^{-3}_{spn11\%}]$$

kde:  $m_{NO_2}^{max}$  – hmotnosť oxidu dusičitého vytvoreného spaľením 1 kg vlhkého bukového dreva [kg],  $V_{spnm}^{min}$  – minimálny objem suchých spalín vytvorených spaľením 1 kg vlhkého bukového dreva [ $m^3$ ]

Hmotnosť oxidu dusičitého vzniknutého v procese spálenia 1 kg vlhkého bukového dreva:

$$m_{\text{NO}_2}^{\text{max}} = X_N * 3,2857 * N^{\text{daf}} * [1 - A^d - W^r] \quad [\text{kg.kg}^{-1}]$$

kde:  $N^{\text{daf}}$  – hmotnostný podiel dusíka v horľavine bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $X_N$  – podiel transformujúceho sa palivového dusíka zo bukového dreva na emisie [-],  $A^d$  – podiel popola v palive  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $W^r$  – relatívna vlhkosť bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$

Minimálny objem suchých spalín vytvorených v procese spálenia 1 kg vlhkého bukového dreva:

$$V_{\text{spnm}} = [1,8555 * C^{\text{daf}} + 0,7905 * V_{\text{vznm}} + (\lambda - 1) * V_{\text{vznm}}] * [1 - A^d - W^r] \quad [\text{m}^3.\text{kg}^{-1}]$$

kde:  $C^{\text{daf}}$  – hmotnostný podiel uhlíka v horľavine bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $V_{\text{vznm}}$  – teoretická spotreba suchého vzduchu na dokonalé spálenie 1 kg bukového dreva  $[\text{m}_n^3.\text{kg}^{-1}]$ ,  $\lambda$  – prebytok spaľovacieho vzduchu [-],  $A^d$  – podiel popola v palive  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $W^r$  – relatívna vlhkosť bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ .

Teoretická spotreba suchého vzduchu na dokonalé spálenie 1 kg bukového dreva:

$$V_{\text{sznm}} = \frac{100}{20,95} * [1,8658 * C^{\text{daf}} + 5,553 * H^{\text{daf}} - 0,6997 * O^{\text{daf}}] \quad [\text{m}_n^3.\text{kg}^{-1}]$$

kde:  $C^{\text{daf}}$  – hmotnostný podiel uhlíka v horľavine bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $H^{\text{daf}}$  – hmotnostný podiel vodíka v horľavine bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ ,  $O^{\text{daf}}$  – hmotnostný podiel kyslíka v horľavine bukového dreva  $[\text{kg.kg}^{-1}]$ .

Funkčný vzťah pre výpočet emisnej veličiny po dosadení a úprave nadobúda tvar:

$$c_{\text{max}} \text{NO}_2 = \frac{X_N * 3,2857 * N^{\text{daf}}}{[1,8555 * C^{\text{daf}} + 0,7905 * V_{\text{vznm}} + (\lambda - 1) * V_{\text{vznm}}]} \quad [\text{kg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}]$$

Maximálna koncentrácia oxidov dusíka  $\text{NO}_x$  vyjadrená formou  $\text{NO}_2$  v suchých spaliniach vzniknutých z palivového dusíka v procese spaľovania bukového dreva, pri obsahu kyslíka v spaliniach  $\text{O}_2 = 11 \%$ , je:

$$c_{\text{max}} \text{NO}_2 = \frac{0,6 * 3,2857 * 0,0016}{[1,8555 * 0,48 + 0,7905 * 4,390 + (2,1 - 1) * 4,390]} = \frac{0,0032}{9,1899} = 0,000348 \quad [\text{kg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}]$$

$$c_{\text{max}} \text{NO}_2 = 348 \quad [\text{mg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}]$$

Technický výpočet hmotnostnej koncentrácie látky v odpadovom plyne (spaliniach) možno v zmysle Prílohy č. 4 k vyhláske MŽP SR č. 706/2002 Z.z. považovať za postačujúco presný, ak relatívna rozšírená neistota vypočítanej koncentrácie nie je vyššia ako:

- 20 %, ak vypočítaná hodnota emisnej veličiny je:  $0,81 \times \text{EL} = 0,81 \times 650 = 526 \text{ mg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}$  a väčšia,
- 30 %, ak vypočítaná hodnota emisnej veličiny je v rozmedzí hodnôt:  $(0,51 \div 0,8) \times \text{EL} = (0,51 \div 0,8) \times 650 = 331 \div 520 \text{ mg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}$ ,
- 50 %, ak vypočítaná hodnota emisnej veličiny je menšia ako:  $0,5 \times \text{EL} = 0,5 \times 650 = 325 \text{ mg.m}^{-3}_{\text{spn11\%}}$ .

#### 4. VÝPOČET RELATÍVNEJ ROZŠÍRENEJ NEISTOTY TECHNICKÉHO VÝPOČTU

Rozšírenú relatívnu neistotu  $U_{C_{max}NO_x}$  technického výpočtu koncentrácie oxidov dusíka v suchých spalinách, na hranici konvenčnej štatistickej spoľahlivosti 95 %, je možné vypočítať z relatívnej štandardnej neistoty hmotnosti oxidu dusičitého v spalinách  $rel u_{NO_2}$  a relatívnej štandardnej neistoty merného objemu spalín  $rel u_{V_{spmn}}$ :

$$U_{C_{max}NO_x} = 2 \times \sqrt{rel u_{NO_2}^2 + rel u_{V_{spmn}}^2}$$

K výpočtu relatívnej štandardnej neistoty hmotnosti oxidu dusičitého v spalinách  $rel u_{NO_2}$  a relatívnej štandardnej neistoty merného objemu spalín  $rel u_{V_{spmn}}$  je potrebné stanoviť (vypočítať) štandardnú neistotu koncentrácie palivového dusíka v bukovej drevnej hmote „ $u_N$ “ a neistoty minimálneho objemu suchých spalín „ $u_{V_{spmn}}$ “.

##### Výpočet relatívnej štandardnej neistoty hmotnosti oxidu dusičitého v spalinách $rel u_{NO_2}$

Rozšírenú štandardnú neistotu obsahu dusíka v bukovom dreve uvádza výsledok merania obsahu dusíka v bukovom dreve (LVÚ vo Zvolení):  $U_N = 0,0002 \text{ kg.kg}^{-1}$ . Štandardná neistota obsahu dusíka v bukovom dreve je:

$$u_N = \frac{U_N}{2} = \frac{0,0002}{2} = 0,0001 \text{ [kg.kg}^{-1}\text{]}$$

Štandardná neistota hmotnosti oxidu dusičitého v spalinách:

$$u_{NO_2} = \sqrt{\left(\frac{\partial m_{NO_2}}{\partial N}\right)^2} * u_N^2 = \sqrt{(0,6 * 3,2857)^2} * 0,0001^2 = 0,0002 \text{ [kg.kg}^{-1}\text{]}$$

Relatívna štandardná neistota hmotnosti oxidu dusičitého v spalinách:

$$rel u_{NO_2} = \frac{u_{NO_2}}{m_{NO_2}} * 100 = \frac{u_{NO_2}}{X_N * 3,2857 * N^h} * 100 = \frac{0,0002}{0,6 * 3,2857 * 0,0016} * 100$$

$$rel u_{NO_2} = 6,34 \%$$

##### Výpočet relatívnej štandardnej neistoty merného objemu suchých spalín $rel u_{V_{spmn}}$

Neistota minimálneho objemu suchých spalín „ $u_{V_{spmn}}$ “ zohľadňuje štandardné neistoty stanovenia elementárneho zloženia horľaviny paliva - obsahu uhlíka  $u_C$ , vodíka  $u_H$  a kyslíka  $u_O$  a štandardnú neistotu spotreby spaľovacieho vzduchu, ktorá je zhodná s mernou spotrebou suchého vzduchu  $u_{V_{szmn}}$ .

Štandardné neistoty stanovenia elementárneho zloženia horľaviny dreva zohľadňujú rozptyl hodnôt zloženia horľaviny palivového dreva uvádzaný v odbornej literatúre, tabuľka č. 2. Pretože počet analyzovaných údajov je  $n = 5$ , vypočítaná hodnota štandardnej neistoty je korigovaná koeficientom počtu analyzovaných údajov  $k = 1,4$  (Jenčík 2003):

$$u_{i_i} = k * u_i = 1,4 * u_i$$

Tabuľka 2 Výpočet štandardnej neistoty elementárneho zloženia palivového dreva

Autor	$C_i$	$\Delta C^2 = (C - C_i)^2$	$H_i$	$\Delta H^2 = (H - H_i)^2$	$O_i$	$\Delta O^2 = (O - O_i)^2$
Perelygin.L. M.	0,495	0,000036	0,063	0,000001	0,442	0,000036
Blažej, A. a kol.	0,495	0,000036	0,063	0,000001	0,442	0,000036
Bučko, J.–Osvald, A	0,504	0,000009	0,061	0,000001	0,434	0,000004
Ladomerský, J. a kol	0,500	0,000001	0,060	0,000004	0,440	0,000016
Trnobranský, K.	0,510	0,000081	0,062	0	0,422	0,000196
	$C = \frac{\sum C_i}{n}$ $C = 0,501$	$\sum \Delta C^2 = 0,000163$	$H = \frac{\sum H_i}{n}$ $H = 0,062$	$\sum \Delta H^2 = 0,000007$	$O = \frac{\sum O_i}{n}$ $O = 0,436$	$\sum \Delta O^2 = 0,000288$
	$u_C = \sqrt{\frac{\sum \Delta C^2}{n * (n-1)}} = \sqrt{\frac{0,000163}{5 * 4}}$ $u_C = 0,0028$		$u_H = \sqrt{\frac{\sum \Delta H^2}{n * (n-1)}} = \sqrt{\frac{0,000007}{5 * 4}}$ $u_H = 0,0006$		$u_O = \sqrt{\frac{\sum \Delta O^2}{n * (n-1)}} = \sqrt{\frac{0,000288}{5 * 4}}$ $u_O = 0,0038$	
	$u_C = 1,4 * 0,0028 = 0,0039$		$u_H = 1,4 * 0,0006 = 0,0008$		$u_O = 1,4 * 0,0038 = 0,0053$	

Štandardnú neistotu mernej spotreby suchého vzduchu na spálenie 1 kg palivového dreva popisuje rovnica:

$$u_{svmn} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{svmn}}{\partial C}\right)^2 * u_C^2 + \left(\frac{\partial V_{svmn}}{\partial H}\right)^2 * u_H^2 + \left(\frac{\partial V_{svmn}}{\partial O}\right)^2 * u_O^2}$$

$$u_{svmn} = \sqrt{\left(\frac{100}{20,95} * 1,8658\right)^2 * u_C^2 + \left(\frac{100}{20,95} * 5,553\right)^2 * u_H^2 + \left(\frac{100}{20,95} * 0,6997\right)^2 * u_O^2}$$

$$u_{svmn} = \sqrt{8,9059^2 * 0,0039^2 + 26,5059^2 * 0,0008^2 + 3,3398^2 * 0,0053^2}$$

$$u_{svmn} = 0,0444 \text{ [m}_n^3\text{]}$$

Štandardnú neistotu merného objemu spalín vytvorený zo spálenia 1 kg bukového dreva uvádza vzťah:

$$u_{Vspmn} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{Vspmn}}{\partial C}\right)^2 * u_C^2 + \left(\frac{\partial V_{Vspmn}}{\partial V_{svmn}}\right)^2 * u_{svmn}^2}$$

$$u_{Vspmn} = \sqrt{1,8555^2 * u_C^2 + (0,7805 + 1,1)^2 * u_{svmn}^2} = \sqrt{1,8555^2 * 0,039^2 + 1,8805^2 * 0,0444^2}$$

$$u_{Vspmn} = 0,0831 \text{ [m}_n^3\text{]}$$

Relatívna štandardná neistota merného objemu spalín vytvorených zo spálenia 1 kg bukového dreva:

$$rel \ u_{Vspmn} = \frac{u_{Vspmn}}{V_{spmn}} * 100 = \frac{u_{Vspmn}}{[1,8555 * C^h + 0,7905 * V_{Vzmn} + (\lambda - 1) * V_{Vzmn}]} * 100 = \frac{0,0831}{9,1899} * 100$$

$$rel \ u_{Vspmn} = 0,90 \%$$

Výpočet rozšírenej relatívnej štandardnej neistoty technického výpočtu  $U_{C_{max}NO_x}$ 

Relatívnu štandardnú neistotu technického výpočtu koncentrácie oxidov dusíka v suchých spalinách stanovenú zlúčením relatívnej štandardnej neistoty obsahu dusíka v palive a relatívnej štandardnej neistoty merného objemu spalín popisuje vzťah:

$$\begin{aligned} u_{rel\ C_{max}NO_x} &= \sqrt{u_{rel\ n}^2 + u_{rel\ V_{spmn}}^2} \\ u_{rel\ C_{max}NO_x} &= \sqrt{6,34^2 + 0,90^2} = 6,40\% \end{aligned}$$

Hodnota rozšírenej relatívnej štandardnej neistoty technického výpočtu koncentrácie oxidov dusíka v suchých spalinách  $U_{C_{max}NO_x}$  je:

$$\begin{aligned} U_{C_{max}NO_x} &= 2 * u_{rel\ C_{max}NO_x} \\ U_{C_{max}NO_x} &= 2 * 6,4\% \\ U_{C_{max}NO_x} &= 12,8\% \end{aligned}$$

Keďže, maximálna hodnota koncentrácie oxidov dusíka  $NO_2$  v suchých spalinách  $c_{max}NO_x$  sa nachádza v intervale 331 - 520  $mg \cdot m^{-3}_{spn11\%}$  a hodnota rozšírenej relatívnej štandardnej neistoty  $U_{C_{max}NO_x} = 12,8\% < 30\%$ , technický výpočet hodnoty emisnej veličiny  $c_{max}NO_x$  je postačujúco presný na stanovenie emisnej hodnoty z procesu spaľovania vlhkého bukového dreva v kotli KD 1160.

**5. ZÁVER – HODNOTA EMISNEJ VELIČINY  $C_{max}NO_x$** 

Z vykonaných analýz možno konštatovať, že hodnota emisnej veličiny  $c_{max}NO_x$  - najvyššia hodnota koncentrácie oxidov dusíka  $NO_x$  vyjadrená formou  $NO_2$  v suchých spalinách z procesu spaľovania bukového dreva stanovená technickým výpočtom je:

$$c_{max}NO_x = 348 [mg \cdot m^{-3}_{spn11\%}].$$

Pre porovnanie a potvrdenie správnosti technického výpočtu sú tabuľke 4 uvedené hodnoty koncentrácie  $NO_x$  vyjadrené formou  $NO_2$  v suchých spalinách z procesu spaľovania vlhkého bukového dreva uvádzané v odbornej literatúre:

**Tabuľka 4** Koncentrácie  $NO_x$  vyjadrené formou  $NO_2$  v suchých spalinách zo spaľovania bukového dreva

Typ kotla	Koncentrácia $NO_2$ v suchých spalinách	Literárny zdroj
CKD Dukla	150 - 379 $mg \cdot m^{-3}_{spn11\%}$	Ladomerský, J.a kol ( 1993 )
bez udania typu	213 $mg \cdot m^{-3}_{spn11\%}$	Guzenda, R.– Swigon, J. ( 1997 )
VSD 1000 Slatina Brno	257 - 315 $mg \cdot m^{-3}_{spn11\%}$	Dzurenda, L. ( 2004 )

**LITERATÚRA**

- [1] Blažej, A a kol. 1973. Chémia dreva, ALFA, Bratislava. 218 s.
- [2] Bučko, J. – Osvald, A. 1997. Rozklad dreva teplom a ohňom. Zvolen. ES TU, 100 s.
- [3] Dzurenda, L. 2003. Tvorba nízkoteplotných oxidov dusíka v procese spaľovania vlhkého dreva v kúreniskách tepelných generátorov. In: Acta Mechanica Slovaca 7(3), s. 207 – 212.



- 
- [4] Dzurenda, L. 2004. Vplyv dreveniny na produkciu emisií NO<sub>x</sub> tvorených formou nízkočplotnej oxidácie palivového dusíka v procese spaľovania dreva. In: Energetika a životní prostředí 2004. Ostrava, VŠB-TU Ostrava., 71-76 s.
- [5] Dzurenda, L. – Banskí, A. 2004. Obsah dusíka v jednotlivých částech stromu a koncentrace NO<sub>2</sub> v spalinách tvorená formou nízkočplotnej oxidácie dusíka v procese spaľovania. In: Acta facultatis xylogiae, II. s. 7 – 14.
- [6] Dzurenda, L. 2005. Spaľovanie dreva a kôry. Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 124 s.
- [7] Janský, J. 1954. Parní kotle. SNTL, Praha. 296 s.
- [8] Jenčík, J. a kol. 2003. Technická měření. ČVUT, Praha. 212 s.
- [9] Fenimore, C. 1971. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13-th International Symposium Combustion. Pittsburgh, 224-229.
- [10] Guzenda, R.– Swigon, J. 1997. Techniczne i ekologiczne aspekty energetycznego wykorzystania drewna i odpadów drzewnych. Gospodarka paliwami i energia, 1/1997, 10 –13 s.
- [11] Kollmann, F. 1951. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. I band. Berlin-Göttingen-Heidelberg-München.
- [12] Ladomerský, J. a kol. 1993. Spaľovanie dreva a dreveného odpadu z ekologického a energetického hľadiska. VPA 6/1993. Zvolen, Edičné stredisko TU vo Zvolene. 68 s.
- [13] Ladomerský, J. a kol. 2000. Energetika a životné prostredie, TU Zvolen, 255 s.
- [14] Mindáš, J.– Stančíková, A. 2004. Vyhodnotenie obsahu dusíka vo fytohmote. LVÚ Zvolen.
- [15] Nussbaumer, T. 1991. Anforderungen an umweltfreundliche Holzfeuerungsanlagen. Holz-und Werkstoff, 49.
- [16] Perelygin, L. M. 1965. Nauka o dreve. SVTL, Bratislava. 444 s.
- [17] Požgaj, A. a kol. 1993. Štruktúra dreva a vlastnosti dreva. Príroda, Bratislava. 485 s.
- [18] Setnička, F. 1981. Tepelná technika pre drevárskych inžinierov. ALFA, Bratislava. 432 s.
- [19] Trnobranský, K. 1976. Analýza procesu hoření dřevního odpadu. Drevo, 31, 237-240 s.
- [20] Zeldovič, J. B. 1947. Okislenie azota pri horení. Moskva.