

Modelovanie produkcie NO_x pri výrobe tepla spaľovaním uhlia

Mária Čarnogurská¹

Modelling the production of NO_x in coal burning

The paper describes a mathematical model of NO_x production derived with the help of dimensional analysis. The model results are compared with direct measurements of the real work. Model laws are presented as well, which enable to transfer the results of the mathematical model to any other work fulfilling the condition of geometric and mechanical similarity.

Key words: mathematical model, NO_x production.

Úvod

V súčasnosti sa z pohľadu požiadaviek, kladených na surovinové zdroje, ukazuje ako významné racionálne využívanie neobnoviteľných (t.j. vyčerpatelných) prírodných zdrojov. Iba prostredníctvom neho možno znižovať energetickú náročnosť a tak efektívne využívať vlastnú surovinovú základňu. K spomínaným surovinovým zdrojom patrí aj uhlie. Jeho ťažba, ale hlavne využitie ako druhotného energetického zdroja by nemali zaťažovať životné prostredie v tom najširšom slova zmysle.

Rozvoj surovinovej a energetickej bázy by mal ruka v ruke kráčať s rozvojom nových teórií a prístupov k spracovávaniu týchto surovín na inú využiteľnú formu. Toto platí aj pre uhlie, ako jeden zo základných energetických zdrojov. Jeho spracovanie do inej využiteľnej formy v energetike znamená vlastne jeho spálenie s cieľom získať tak tepelnú ako aj elektrickú energiu. Pri takejto premene uhlia vždy dochádzalo a ešte aj dochádza k významnému vplyvu na životné prostredie, čo sa prejavuje hlavne produkovanými emisiami do ovzdušia. Jednými z významných sú emisie dusíka (NO_x). Ich produkcia i spôsoby likvidácie sú v súčasnosti v odbornej literatúre a v zásade aj v reálnej praxi zvládnuté, avšak samotná produkcia emisií NO_x si žiada overiť v praxi aj nové (finančne menej nákladné) postupy.

Prehľad základných výskumných postupov pri určovaní produkcie NO_x

Z hľadiska samotnej podstaty produkcie NO_x sa môžu metódy výskumu rozdeliť do dvoch základných skupín:

- výskum realizovaný na konkrétnom diele (elektrárni, teplárni, výhrevni),
- výskum modelový.

Skúmať produkciu NO_x na konkrétnom diele, t.j. postupovať podľa prvej metódy výskumu, znamená zhodnotiť stav produkcie NO_x *in situ* a v prípade prekročenia stanoveného emisného limitu následne rozhodnúť o spôsobe jej likvidovania.

Druhá výskumná metóda umožňuje skúmať stav produkcie NO_x *na modeli*, pričom model môže byť tak fyzikálny ako aj matematický (Čábelka, 1987).

Fyzikálne modely nachádzajú svoje opodstatnenie v prípade, ak matematické riešenie konkrétnej úlohy je veľmi obtiažne, resp. nemožné vzhľadom na charakter skutočného diela. V týchto modeloch sú podmienky charakterizujúce skutočné dielo (reálnu úlohu) reprodukované v určitej mierke (spravidla vždy sú modely menšie ako reálne dielo). Pri fyzikálnych modeloch sa často uplatňuje takzvané *približné modelovanie*, pri ktorom sa model nestotožňuje s dielom vo všetkých parametroch, ako by to vyžadovala teória. Často sa však neúplný fyzikálny model (model približný) prijíma ako jediné možné riešenie, a to vtedy, ak iné metódy a postupy nezaručujú získanie lepších výsledkov ako uplatnené približné modelovanie. V mnohých prípadoch úplný fyzikálny model nie je ani žiaduci.

Matematické modely sú založené na popise javov matematickými vzťahmi, využívajúc pritom, ak je to možné, známe matematické postupy. Výsledkom matematického modelovania je najčastejšie vyjadrená závislosť, ktorá popisuje skúmaný jav na vybraných relevantných veličinách (veličinách, pri ktorých sa predpokladá zásadný vplyv na daný jav).

Ak známe matematické postupy zlyhávajú, uplatnenie nachádza metóda analýzy rozmerov – *rozmerová analýza*. Špeciálny prípad matematického modelovania v predstavujú numerické metódy, založené na *metóde prvkov (MKP)*. Jej výhodou je, že pri vytváraní modelu sa vychádza zo základných zákonov fyziky a mechaniky a že modelovaný jav možno opakovať s meniacimi sa podmienkami, čím možno daný jav optimalizovať.

¹ Doc Ing. Mária Čarnogurská, CSc., Katedra energetickej techniky Strojníckej fakulty Technickej univerzity, Letná 9, 043 87 Košice (Doručené 24.1.2000, revidovaná verzia doručená 15.5.2000)

Pri skúmaní produkcie NO_x matematickým modelovaním bude rozhodujúce vytipovať také fyzikálne veličiny, od ktorých produkcia NO_x jednoznačne závisí, nakoľko vynechanie niektorej veličiny bude znamenať, že proces tvorby NO_x na nej nezávisí (aj keď to v skutočnosti nebude pravda) takže model nebude exaktne odrážať podmienky existujúce na skutočnom diele. Presvedčiť sa o tom možno iba tak, že produkcia NO_x bude zameraná na skutočnom diele a výsledky budú porovnané s výsledkami získanými za tých istých podmienok z matematického modelu. Ak výsledky z porovnania obidvoch postupov budú totožné, matematický model bude mať dostatočne všeobecnú platnosť pre všetky iné a ďalšie diela (ktoré ešte nemusia byť v čase matematického modelovania k dispozícii), ktoré budú spĺňať aspoň v hlavných rysoch geometrickú a tiež aj mechanickú podobnosť. Dielo a model sú si *geometricky* podobné vtedy, ak všetky odpovedajúce si dĺžky na modeli sú zmenšené v rovnakom pomere. Toto kritérium matematicky vyjadruje merítka zmenšenia modelu $c_l = l'/l$. (Čiarkou sú označené veličiny vzťahujúce sa na dielo). O *fyzikálnej* podobnosti hovoríme vtedy, ak model a dielo sú si podobné geometricky a ak pri úmerných hmotnostiach homologických bodov sú si geometricky podobné aj dráhy, ktoré tieto body v úmerných dobách opíšu. Toto kritérium vyjadrujú nasledujúce merítka zmien síl $c_{F_x} = c_{F_y} = c_{F_z} = c_F = F'/F$, hmotností $c_m = m'/m$ a času $c_t = t'/t$. Podobnosť *dynamická* a *kinematická* nie je v prípade vyšetřovania produkcie NO_x relevantná.

Postup tvorby matematického modelu – všeobecná časť

V súčasnosti sú známe niektoré matematické modely produkcie NO_x (Ibler, 1990), ktoré sú však založené hlavne na chemickej analýze uhlia a často neodrážajú skutočnú produkciu NO_x. Samotná laboratórna analýza uhlia spaľovací skutočný proces nepopisuje, preto modely založené iba na jej výsledkoch nie sú relevantné.

Základom matematického modelu prezentovaného v príspevku je *rozmerová analýza*, založená na princípe rozmerovej homogenity rovníc. Vo všeobecnom prípade ide vždy o úplnú fyzikálnu rovnicu, ktorá vyjadruje závislosť celkom n vybraných relevantných veličín V_1, V_2, \dots, V_n rôznych rozmerov v tvare (Kožešník, 1983)

$$\varphi(V_1, V_2, \dots, V_n) = 0. \quad (1)$$

Z týchto relevantných veličín možno zostrojiť rozmerovú maticu a jej riešením získať bezrozmerové zoskupenia týchto veličín v tzv. bezrozmerových argumentoch π_i . Podľa Buckinghamovej π - teóremy možno tvar rovnice (1) zapísať aj nasledovne

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0, \quad (2)$$

odkiaľ možno jeden bezrozmerový argument vyjadriť ako funkciu ostatných, napr. takto

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n), \quad (3)$$

pričom dbáme, aby závisle premenná veličina (π_1) bola funkciou NO_x. Ostatné veličiny π_2, \dots, π_n budú nezávisle premenné.

Z požiadavky rozmerovej rovnorodosti vyplýva, že veličiny V_1, V_2, \dots, V_n nemôžu v danej rovnici vystupovať samostatne, ale v skupinách v tvare

$$\pi_i = V_1^{x_{1i}} \cdot V_2^{x_{2i}} \cdot \dots \cdot V_n^{x_{ni}}, \quad \text{kde } i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

Veličina π je bezrozmerová premenná a nazýva sa tiež *kritériom podobnosti, podobnostným číslom*, či *invariantom podobnosti*, ktorého rozmer je rovný jednej, takže $[\pi_i] = 1$ je prosté číslo.

Bezrozmerové argumenty v rovnici (2) musia byť teda rozmerovo nezávislé, to znamená, že rovnicu (2) možno (rozmerovo, nie funkčne) tiež písať v tvare

$$[\pi_1]^{u_1} \cdot [\pi_2]^{u_2} \cdot \dots \cdot [\pi_k]^{u_k} = 1 \quad (5)$$

Uvedený vzťah (5) platí vždy vtedy, ak $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k = 1$, resp. ak $u_1 = u_2 = \dots = u_k = 0$.

Vybraný počet relevantných veličín V_1, V_2, \dots, V_n má celkom m rozmerovo nezávislých jednotiek Z_1, Z_2, \dots, Z_m , pričom platí, že počet jednotiek je vždy menší ako počet veličín, t.j. $m < n$.

Napr. pre veličinu V_1 možno jej jednotky zapísať v tvare

$$[V_1] = Z_1^{a_{11}} \cdot Z_2^{a_{12}} \cdot \dots \cdot Z_m^{a_{1m}}. \quad (6)$$

Rovnako postupujeme pre ostatné veličiny charakterizujúce produkciu NO_x. Z rovnice (6) pre neznáme exponenty vyplývajú tieto podmienky

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = 0, \quad (7)$$

resp. skrátene $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_i = \mathbf{0}$. (8)

Pre všetky fyzikálne veličiny a ich jednotky možno zostaviť maticu v tvare

$$\begin{matrix} & V_1 & V_2 & \dots & V_n \\ Z_1 & \left\| \begin{matrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{n1} \end{matrix} \right\| \\ Z_2 & \left\| \begin{matrix} a_{12} & a_{22} & \dots & a_{n2} \end{matrix} \right\| \\ \vdots & \left\| \begin{matrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{matrix} \right\| \\ Z_m & \left\| \begin{matrix} a_{1m} & a_{2m} & \dots & a_{nm} \end{matrix} \right\| \end{matrix} \quad (9)$$

Jej hodnosť je $h \leq m$. Pretože počet neznámych je väčší ako počet rovníc, nie sú neznáme x_1, x_2, \dots, x_n z rovnice (4) jednoznačne určené. Pri ich určovaní postupujeme nasledovne. Maticu \mathbf{A} rozdelíme na dve časti. Prvá má h stĺpcov a h riadkov (štvorcová matica), pričom stĺpce sú v nej vybrané tak, aby jej determinant bol nenulový. Rovnako rozdelíme aj vektor neznámych \mathbf{x}_i . Detailný postup je uvedený v práci (Čarnogurská, 1998).

Matematický model produkcie NO_x

Medzi relevantné veličiny, ovplyvňujúce produkciu emisií NO_x na modelovom zariadení, boli na základe skúseností prevádzkovateľa spaľovacieho zariadenia vybrané tie veličiny, ktoré spaľovací proces charakterizujú, sú jednoducho merateľné a vystihujú rozhodujúci parameter geometrickej podobnosti pretransformovaný do výkonu zariadenia. Ide o nasledovné veličiny

- výhrevnosť paliva Q_u^r [Jkg^{-1}],
- výkonnosť kotla P_k [kg s^{-1}],
- množstvo spaľovacieho vzduchu Q_{vz} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
- podtlak v kotle p_p [$\text{kg s}^{-2} \text{m}^2$],
- teplota spalín na konci kotla T_{sk} [K],
- teplota spaľovacieho vzduchu T_{vz} [K].

Úplná fyzikálna rovnica, vyjadrujúca závislosť vybraných relevantných rozmerových veličín s rôznymi rozmermi, má podľa (1) tvar

$$\varphi(Q_u, P_k, Q_{vz}, p_p, \text{NO}_x, T_{sk}, T_{vz}) = 0. \quad (10)$$

Na základe rozmerovej rôznorodosti relevantných veličín budú tieto vystupovať podľa rovnice (1) v skupinách, t.j.

$$\pi_i = Q_u^{x_1} \cdot P_k^{x_2} \cdot Q_{vz}^{x_3} \cdot p_p^{x_4} \cdot \text{NO}_x^{x_5} \cdot T_{sk}^{x_6} \cdot T_{vz}^{x_7}. \quad (11)$$

Pretože medzi vytypovanými relevantnými rozmerovými veličinami sa vyskytuje rozmer teploty dvakrát, pomer T_{sk}/T_{vz} predstavuje simplex, ktorý sa do riešenia zahrnie následne.

Rozmerová matica \mathbf{A} pre základné jednotky bude preto mať $n = 6$ stĺpcov a $m = 4$ riadky a má tvar

$$\begin{matrix} & Q_u & P_k & Q_{vz} & p_p & NO_x & T_{sk} \\ m & \left\| \begin{matrix} 2 & 0 & 3 & -1 & -3 & 0 \\ -2 & -1 & -1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \\ s & & & & & & \\ kg & & & & & & \\ K & & & & & & \end{matrix} \quad (12)$$

Pri hodnosti matice $h = 4$ a počte relevantných veličín $n = 6$ možno vytvoriť celkom $i = n - h$, t.j. 2 bezrozmerové argumenty π .

Neznáme veličiny nemožno jednoznačne určiť, pretože počet neznámych $x_i > m$. Obdĺžnikovú maticu **A** podľa požiadavky uvedenej vyššie rozdelíme na dve časti a rovnako postupujeme aj v prípade rozdelenia vektora neznámych veličín x_i . Prvá časť matice je štvorcová s počtom h stĺpcov a h riadkov, pričom stĺpce z matice **A** sú vybraté tak, aby jej determinant bol nenulový ($\Delta \neq 0$). Tomu odpovedá aj rozdelenie vektora **x**. Tvar štvorcovej matice **P** a vektora neznámych veličín x_i z rovnice (12) upravíme a zapíšeme zjednodušene nasledovne

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{R} = (-1) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{S} \quad (13)$$

V rozpísanom tvare bude rovnica (13) (vyjadrená pomocou (11) a (12)) upravená nasledovne

$$\left\| \begin{matrix} 2 & 0 & 3 & 0 \\ -2 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_6 \end{matrix} \right\| = (-1) \cdot \left\| \begin{matrix} -3 & -1 \\ 0 & -2 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} x_5 \\ x_4 \end{matrix} \right\| \quad (14)$$

Determinant matice **R** sa určí napr. na základe Laplaceovho rozvoja. Jeho hodnota je podľa (14) je $\Delta_A = -4$.

Voľbu prebytočných neznámych x_5 a x_4 urobíme dvakrát, pričom obidve voľby musia byť lineárne nezávislé. Matica volieb má tvar

$$\begin{matrix} & x_5 & x_4 \\ 1.\text{voľ.} & \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\| \\ 2.\text{voľ.} & & \end{matrix} \quad (15)$$

jej determinant má hodnotu $\Delta = 1$, čím je splnená podmienka riešiteľnosti úlohy.

Násobením matíc podľa (13) dostaneme

$$\left\| \mathbf{P} \right\|_{4 \times 4} \cdot \left\| \mathbf{R} \right\|_{4 \times 1} = \left\| \mathbf{C} \right\|_{4 \times 1} \quad (16)$$

$$\left\| \mathbf{Q} \right\|_{4 \times 2} \cdot \left\| \mathbf{S} \right\|_{2 \times 1} = \left\| \mathbf{F} \right\|_{4 \times 1} \quad (17)$$

Potom musí tiež platiť, že

$$\left\| \mathbf{C} \right\|_{4 \times 1} = (-1) \cdot \left\| \mathbf{F} \right\|_{4 \times 1} \quad (18)$$

Nakoľko typ matíc vo výraze (18) je rovnaký, pre prvky matice pri uplatnení tohoto vzťahu musí platiť

$$\begin{matrix} 2x_1 + 3x_3 = 3x_5 + x_4 \\ -2x_1 - x_2 - x_3 = 2x_4 \\ x_2 = -x_5 - x_4 \\ x_6 = 0 \end{matrix} \quad (19)$$

Riešením sústavy lineárnych rovníc (19) obdržíme ako riešenie tieto dva nezávislé vektory

$$\begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ \pi_1 & \left| \begin{matrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \right| \\ \pi_2 & & & & & \end{matrix} \quad (20)$$

Tomuto riešeniu odpovedajú dva komplexné bezrozmerné argumenty v tvare

$$\begin{aligned}\pi_1 &= Q_{vz}^{-1} \cdot NO_x^{-1} \cdot P_k^{-1}, \\ \pi_2 &= Q_{vz}^{-1} \cdot p_p^{-1} \cdot Q_u^{-1} \cdot P_k^{-1}.\end{aligned}\quad (21)$$

Tretí bezrozmerný argument tvorí samotný simplex, ktorý má nezávislé vektory

$$\begin{array}{cc} x_6 & x_7 \\ | & | \\ 1 & -1 \end{array}\quad (22)$$

a samotný argument je v tvare

$$\pi_3 = T_{sk} \cdot T_{vz}^{-1}.\quad (23)$$

Bezrozmerný tvar funkcie popisujúcej tvorbu NO_x na modeli možno zapísať v tvare

$$\Psi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0.\quad (24)$$

Bezrozmerný argument π_1 obsahuje veličinu NO_x , preto tento argument možno vyjadriť ako funkciu ostatných dvoch argumentov v tvare

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3).\quad (25)$$

Merania na modeli ukázali, že kritérium π_3 sa v rozsahu meraných hodnôt prakticky nemení. Stredná hodnota simplexu $\pi_3 = T_{sk}/T_{vz} = 0,852$.

Fyzikálnym modelom pre overenie matematického modelu sa stalo skutočné dielo s charakteristickým výkonom $P = 50 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Toto predstavuje krajinú podmienku podobnosti, kedy model a dielo sú v merítke 1:1. Na základe toho možno vzťah (25) písať v tvare

$$\pi_1 = K \cdot \varphi(\pi_2).\quad (26)$$

Túto funkciu možno znázorniť jednoparametrickou sústavou kriviek (parametrom bude T_{sk}/T_{vz}). Jej tvar sa určí tak, že pre pomer T_{sk}/T_{vz} sa vypočíta hodnota π_2 z hodnôt získaných meraním a zakreslí sa ako nezávisle premenná hodnota. Argument π_1 (a tým aj NO_x) sa následne znázorní ako funkcia závisle premenná argumentu π_2 .

Z nameraných hodnôt relevantných veličín na modelovom zariadení možno na základe uvedeného zobrazíť skutočný priebeh funkcie $\pi_1 = \varphi(\pi_2)$ týchto bezrozmerných argumentov, najvhodnejšie v logaritmickej súradniciach. Za predpokladu lineárnej závislosti týchto bezrozmerných argumentov π_1, π_2 , čo pre všeobecnú exponenciálnu závislosť zobrazenú v logaritmickej súradniciach vždy platí, možno vzťah (26) medzi nezávisle premennou π_2 a závisle premennou π_1 popísať rovnicou v tvare

$$\pi_1 = K \cdot A \cdot \pi_2^B,\quad (27)$$

ktorú logaritmovaním pretransformujeme na rovnicu priamky

$$\log \pi_1 = \log K + \log A + B \cdot \log \pi_2.\quad (28)$$

Výpočet lokujúcej konštanty A a regresného súčiniteľa B určíme na základe metódy najmenších štvorcov. Vypočítaná hodnota lokujúcej konštanty a regresného súčiniteľa bola

$$\begin{aligned}a &= -1,931694902, \\ b &= 0,24157731.\end{aligned}$$

Pretože $a = \log A \Rightarrow A = 10^a = 10^{-1,931694902} = 0,0117008$.
 $b = B$.

Z hľadiska použitia takto vypočítaných konštánt budeme v ďalšom uvažovať s ich zaokrúhľenými hodnotami, tj.: $A = 0,0117$, $B = 0,2416$.

Pomocou rozmerovej analýzy vytvorený model tvorby produkcie NO_x pri spaľovaní čierneho uhlia pre modelové zariadenie bude mať podľa (27) nasledujúci tvar závislosti relevantných rozmerových veličín

$$\frac{NO_x}{P_k} \cdot Q_{vz} = K \cdot A \cdot \left(\frac{Q_{vz} \cdot p_p}{Q_u \cdot P_k} \right)^B.\quad (29)$$

Zo vzťahu (29) vyjadrená funkčná závislosť produkcie NO_x na vybraných veličinách bude v tvare

$$NO_x = K \cdot A \cdot Q_{vz}^{(B-1)} \cdot p_p^B \cdot Q_u^{-B} \cdot P_k^{(1-B)} \quad (30)$$

Po doplnení strednej hodnoty simplexu, vypočítaných hodnôt regresného súčiniteľa, ako aj lokujúcej konštanty do výrazu (30), nadobudne tento vzťah pre produkciu oxidu dusíka tvar

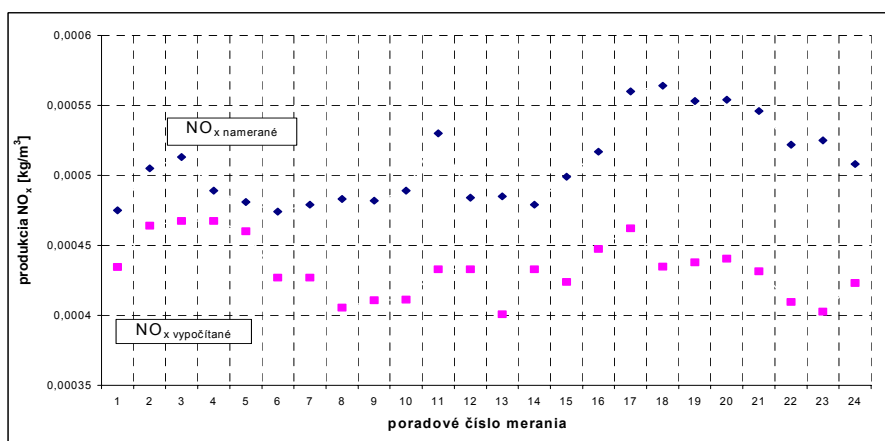
$$NO_x = 0,852 \cdot 0,0117 \cdot \left(\frac{Q_{vz}}{P_k}\right)^{0,2416-1} \cdot \left(\frac{p_p}{Q_u}\right)^{0,2416} \quad (31)$$

Všeobecný tvar závislosti NO_x od vytipovaných relevantných veličín reprezentuje nasledujúci výraz

$$NO_x = C \left(\frac{Q_{vz}}{P_k}\right)^m \cdot \left(\frac{p_p}{Q_u}\right)^n \quad (32)$$

kde jednotlivé konštanty predstavujú hodnoty: $C = 0,00997$, $m = -0,7584$, $n = 0,2416$.

Vzťah (32) predstavuje matematický model produkcie NO_x pri spaľovaní fosílnych palív v kotloch veľkých výkonov podobnej konštrukcie, spĺňajúcich geometrickú podobnosť. Na základe neho vypočítané hodnoty produkovaného NO_x pri konkrétnych nameraných hodnotách relevantných veličín počas spaľovacieho procesu sú zobrazené na obr.1.



Obr.1 Namerané a vypočítané hodnoty NO_x.

Rozdiel medzi nameranými a vypočítanými hodnotami možno zdôvodniť tým, že pri výbere relevantných veličín sa nezohľadnili exaktne všetky vplyvy, od ktorých produkcia NO_x závisí. Stalo sa to preto, že model je vytvorený prísne na fyzikálnych veličinách, ktoré u prevádzkovateľa sú jednoducho merateľné a pomocou ktorých možno jednoduchým spôsobom produkciu NO_x ovplyvňovať zmenou regulácie spaľovacieho procesu. Ďalší postup môže predstavovať úpravu vzťahu (32) pomocou opravného súčiniteľa tak, aby sa rozdiel medzi nameranými a vypočítanými hodnotami eliminoval na minimálnu hodnotu, resp. vzťah (32) môže byť používaný pri ďalších aplikáciách s tým, že chyba medzi nameranými a vypočítanými hodnotami bude sprevádzať každú ďalšiu aplikáciu, čo je treba mať na zreteli. Emisný limit produkovaného NO_x podľa Prílohy č.4 NV č. 92/96 je 500 mg.m⁻³. Stredná chyba určená z prezentovaného modelu predstavuje 5,54 %, čo je 27,7 mg NO_x v jednom metri kubickom spalín. Rozhodujúce bude pri regulácii kotla zabezpečiť spaľovací režim tak, aby produkcia NO_x v zmysle využitia modelu (32) na reguláciu, neprekračovala 472,3 mg NO_x.m⁻³ spalín a vtedy bude garantované neprekročovanie emisného limitu.

V zmysle modelových zákonov, ktoré vyplývajú z porovnania bezrozmerových argumentov diela a modelu, možno napísať, že

$$\pi_{1(\text{model})} = \pi_{1(\text{dielo})} \quad \text{a} \quad \pi_{2(\text{model})} = \pi_{2(\text{dielo})} \quad (33)$$

Po rozpísaní bezrozmerových argumentov pre model a dielo podľa (33) pomocou relevantných veličín dostaneme kritériá podobnosti v tvare

$$\frac{\text{NO}_x}{P_k} Q_{vz} = \frac{\text{NO}_x'}{P_k'} Q_{vz}' \quad \text{a} \quad \frac{Q_{vz} P_p}{Q_u P_k} = \frac{Q_{vz}' P_p'}{Q_u' P_k'} \quad (34)$$

Z rovníc (33) a (34) po vyjadrení merítok zmien jednotlivých veličín napr. pre množstvo spaľovacieho vzduchu

$$\frac{Q_{vz}'}{Q_{vz}} = c_{Q_{vz}}, \quad \text{výkon kotla} \quad \frac{P_k'}{P_k} = c_{P_k}, \quad \text{atď.}, \quad (35)$$

dostaneme dva modelové zákony podobnosti, nazývané tiež indikátory podobnosti. Ich počet vždy odpovedá počtu bezrozmerových argumentov. Počet konštánt úmernosti vždy odpovedá počtu relevantných veličín. V našom prípade je počet relevantných veličín sedem, avšak z dôvodu konštantného pomeru T_{sk}/T_{vz} sa znížil na päť. Modelové zákony majú potom tvar

$$1 = \frac{c_{\text{NO}_x} \cdot c_{Q_{vz}}}{c_{P_k}}, \quad 1 = \frac{c_{Q_{vz}} \cdot c_{P_p}}{c_{Q_u} \cdot c_{P_k}} \quad (36)$$

Aplikácia modelových zákonov pre rôzne podmienky spaľovania

Predpokladajme, že skutočné dielo sa od modelu líši zmenou režimu spaľovania. Nech sa merítka zmeny relevantných veličín riadi vzťahom (35). Pri podmienke piatich neznámych veličín a dvoch bezrozmerových argumentov môžeme zvoliť tri merítka zmeny relevantných veličín a dve vypočítať z modelových zákonov. Následne získame tieto informácie:

Pre volené merítka:

- a) $c_{Q_{vz}} = 2$, $c_{P_p} = 2$, $c_{Q_u} = 2$ budú pomocou modelových zákonov vypočítané merítka ostatných veličín nasledovné

$$\frac{c_{P_k}}{c_{Q_{vz}}} = c_{\text{NO}_x}, \quad \frac{c_{Q_{vz}} \cdot c_{P_p}}{c_{Q_u}} = c_{P_k} \quad (37)$$

Po dosadení konkrétnych hodnôt merítok zmien relevantných veličín do (37) bude mať merítka zmeny výkonu hodnotu rovnú dvom ($c_{P_k} = 2$) a následne vypočítané merítka zmeny produkcie dusíka nadobudne hodnotu $c_{\text{NO}_x} = 1$.

Pretože súčasne platí, že $\frac{\text{NO}_x'}{\text{NO}_x} = c_{\text{NO}_x} \Rightarrow \text{NO}_x' = c_{\text{NO}_x} \cdot \text{NO}_x$, teda $\text{NO}_x' = 1 \cdot \text{NO}_x$.

Pri takto zvolených merítkach zmeny fyzikálnych veličín by produkcia NO_x na diele bola rovnaká ako na modeli.

Pre volené merítka:

- b) $c_{Q_{vz}} = 2$, $c_{P_p} = 1$, $c_{Q_u} = 2$ aplikáciou modelových zákonov bude vypočítané merítka zmeny výkonu na diele a modeli podľa (37) $c_{P_k} = 1$ a na základe neho vypočítané merítka zmeny produkcie oxidu

dusíka bude $c_{NO_x} = 0,5$. Pri takto zvolených merítkach by produkcia NO_x na diele dosahovala polovičnú hodnotu vzhľadom na hodnotu zistenú meraním na modeli.

V prípade voľby merítok zmeny, udávajúcich pomer relevantných veličín na diele a modeli tak, **že všetky** (volené i vypočítané) **by nadobudli hodnotu 1**, nie je možné vyhotoviť dielo na základe skúmaného modelu, pretože veľkosť diela a modelu je rovnaká, a teda merítko modelu a diela je 1:1.

Pre každé ďalšie dielo možno výraz (32) upraviť podľa zmeny merítka udávajúceho pomer veľkosti tej ktorej relevantnej veličiny na diele, v porovnaní s veličinou na modeli. Platnosť vzťahu (32) musí byť pritom vždy zachovaná. Môže ísť o zmenu všetkých relevantných veličín, ale vždy pri dodržaní platnosti modelových zákonov, t.j. merítko niektorých veličín bude zvolené, ostatné budú vypočítané z modelových zákonov. Všeobecne pre dielo možno výraz (32) na určenie produkcie NO_x na základe vyššie uvedených podmienok písať v tvare

$$NO_x = 0,0117 \frac{c_{T_{sk}} T_{sk}}{c_{T_{vz}} T_{vz}} \left(\frac{c_{Q_{vz}} Q_{vz}}{c_{P_k} P_k} \right)^{-0,7584} \left(\frac{c_{P_p} P_p}{c_{Q_u} Q_u} \right)^{0,2416} \quad (38)$$

Záver

Záverom treba povedať, že určiť produkciu NO_x exaktne nie je možné na základe doteraz známych matematických formulácií. Všetky analytické vyjadrenia dávajú približné informácie o produkcii NO_x a ukazuje sa, že aj model získaný na základe teórie rozmerov (vzťah (32)) nebude výnimkou.

Aj napriek nedostatku vypracovaného modelu možno prehlásiť, že ide o prvý pokus v oblasti spaľovania uhlia zachytiť produkciu emisií v závislosti na prevádzkových podmienkach, pri ktorých spaľovací proces prebieha. Je preto opodstatnené venovať pozornosť aplikácii odvodeného matematického modelu pri regulácii spaľovacieho režimu kotlov a primeraným spôsobom zasahovať do jeho dotvorenia tak, aby prevádzkovateľ zariadenia mohol na základe zvoleného režimu spaľovania posúdiť, či emisie produkované počas procesu spaľovania budú spĺňať požiadavku, kladenú na dodržanie Prílohy č.4 NV č. 92/96 Z.z. o emisných limitoch.

Literatúra

- Čábelka, J., Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. *Academia, Praha 1987.*
- Čarnogurská, M.: Rozmerová analýza a teória podobnosti a modelovania v praxi. *TU Košice, 1998.*
- Ibler, Z., Karták, J.: Modely výpočtu emisi oxidu dusíku při spalování fosilních paliv. *Energetika, 40/9/10, 1990, str. 346-347.*
- Kožešník, J.: Fyzikální podobnost a stavba modelů. *Jčm+f, Praha 1948.*
- Kožešník, J.: Teorie podobnosti a modelování. *Academia, Praha 1983.*