

Matematické modely vyhořívání uhelných částic v pádové trubce

Ing. Radim Paluska ¹, Ing. Jiří Horák, Ph.D. ¹, Ing. Michal Stáňa, Ph.D. ², Ing. Marian Bojko, Ph.D. ²

¹ Výzkumné energetické centrum, Ostrava Poruba, radim.paluska@vsb.cz, jiri.horak2@vsb.cz
² VŠB - Technická univerzita Ostrava, Ostrava Poruba, michal.stana@vsb.cz, marain.bojko@vsb.cz

Přijato: 21. 4. 2009, recenzováno: 5. a 7. 6. 2009

Abstrakt

Termokinetické vlastnosti tuhých paliv, zejména uhlí, lze experimentálně stanovit v zařízení zvaném pádová trubka. Získané výsledky měření popisují průběh vyhořívání částic paliva. Citlivé místo všech matematických modelů je v definici vstupních parametrů paliva. Pro jedno konkrétní palivo byly vypracovány dva matematické modely jeho vyhořívání v pádové trubce za použití softwaru FLUENT a ANSYS. V příspěvku jsou porovnány a diskutovány výsledky těchto modelů. Experimentálně zjištěné parametry paliva z pádové trubky budou sloužit pro optimalizaci a úpravu vstupních konstant modelů charakterizujících dané palivo.

Mathematical models of pulverised coal particles burnout in the drop tube

Thermokinetic properties of solid fuels, especially coals, can be experimentally determined in experimental facility called drop tube. Obtained results from tests describe behaviour of fuel particles during burn-out. Points at issue of all mathematical models are in definition of input parameters of fuel. There were worked-out two models for one specific fuel in programs FLUENT and ANSYS. In this paper are compared and discussed results of these models. Experimentally observed parameters of fuel from drop-tube will serve to optimization and adjustment of input constants of models which characterizing given fuel.

Mathematische Modelle des Abbrandes von Kohlepartikeln im Fallrohr

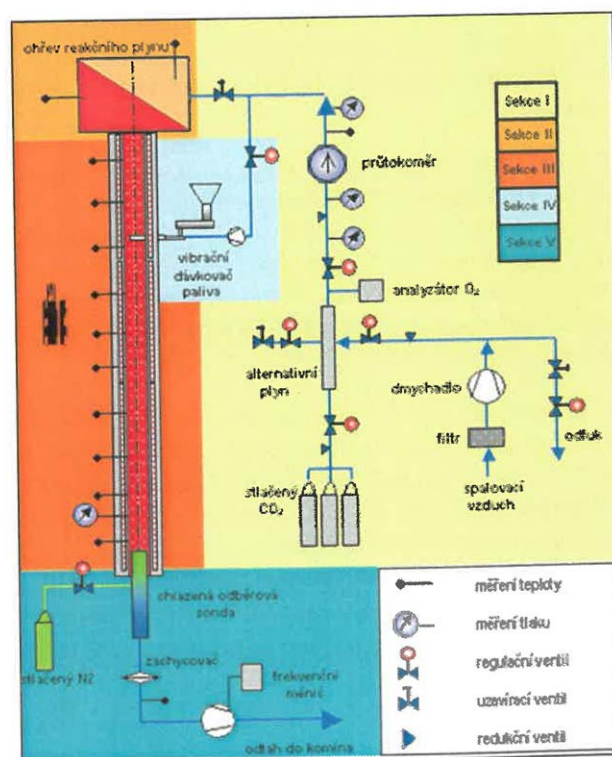
Die thermokinetischen Eigenschaften der festen Brennstoffe, besonders der Kohle, können experimentell bestimmt werden in einer Einrichtung genannt Fallrohr. Die gewonnen Messungsergebnisse beschreiben den Verlauf des Abbrandes von Brennstoffteilchen. Eine sensible Stelle aller mathematischen Modelle liegt in der Definition von Input-Parametern des Brennstoffes. Für einen konkreten Brennstoff wurden zwei mathematische Modelle des Abbrandes im Fallrohr unter Anwendung von Software FLUEN und ANSYS ausgearbeitet. Im Beitrag werden Ergebnisse dieser Modelle verglichen und erörtert. Die aus dem Fallrohr experimentell ermittelten Brennstoffparameter werden zur Optimierung und Aufbereitung von Input-Konstanten, die den jeweiligen Brennstoff charakterisieren, dienen.

Klíčová slova: termokinetické vlastnosti práškového uhlí, pádová trubka, matematické modelování, FLUENT, ANSYS.
Keywords: thermokinetic properties of pulverised coal, drop tube, mathematical modelling, FLUENT, ANSYS.

Pádová trubka

Na výzkumném energetickém centru bylo vybudováno experimentální zařízení zvané pádová trubka. Toto zařízení (obr. 1) dokáže simulovat podmínky panující v reakčním prostoru kotlů velkých uhelných bloků spalujících práškové uhlí a to za předem stanovených okrajových podmínek, kterými jsou teplota, složení a rychlost proudění reakčního plynu v reakční komoře [1]. Výsledkem experimentu je pak tzv. křivka vyhořívání, která charakterizuje vlastnosti daného paliva při procesu vyhořívání v oxidačním prostředí.

Vzorek paliva o známé granulometrii je do reakční komory kontinuálně vstřikován z boku chlazenou dávkovací sondou rovnoběžně s osou reakční komory, ve které proudí reakční plyn o známé koncentraci O_2 , teplotě a rychlosti. Během „pádu“ částic práškového uhlí směrem k bodu prudkého zchlazení dochází k postupnému zahřátí částic, jejich vysušení, uvolnění a vyhoření prchavé hořlaviny a následně probíhá vyhořívání fixního uhlíku. Výše uvedené fáze se mohou překrývat a jsou provázeny úbytkem hmotnosti, který v závislosti na čase udává křivku vyhořívání paliva v reakční komoře. Tento proces je charakterizován kinetickými konstantami, které jsou pro každé palivo odlišné.



Obr. 1: Technologické schéma pádové trubky

Vstupní parametry společné pro oba modely

V programech byla vytvořena výpočetní síť odpovídající tvaru a rozměru reálné pádové trubky tak, aby výsledky z modelů mohly být porovnány s experimentálními daty. Model pádové trubky má délku $L = 4,9$ m a vnitřní průměr $D = 66$ mm.

Oba matematické modely jsou definovány okrajovými podmínkami, při kterých celý proces vyhořívání probíhá (tab. 1).

Tabulka 1: Vstupní parametry směsi plynu

Vstupní parametry směsi plynu			
Obsah kyslíku	O_2	% _{hm}	8,7
		% _{obj}	10
Obsah dusíku	N_2	% _{hm}	28,5
		% _{obj}	37,6
Obsah CO_2	CO_2	% _{hm}	62,8
		% _{obj}	52,4
Rychlost plynu	v	$m \cdot s^{-1}$	2
Teplota plynu	T	K	1200
Hmotnostní tok plynu	Q_m	$g \cdot s^{-1}$	2,54

Tabulka 2: Vstupní parametry paliva

Vstupní parametry paliva		
Podíl spalitelné frakce	% _{hm}	32,0
Podíl prchavé hořlaviny	% _{hm}	33,8
Podíl popela	% _{hm}	26,2
Obsah vody	% _{hm}	8,0
Průměr částic	μm	90
Teplota částic	$^{\circ}C$	20
Hmotnostní tok částic	$g \cdot s^{-1}$	5,56E-03

Parametry částic práškového uhlí na vstupu do reakční komory pádové trubky jsou uvedeny v tab. 2.

Pro zjednodušení a minimalizaci vlivu granulometrie bylo v této fázi výpočtu uvažováno s kulovými částicemi o jednotném průměru.

Práškové uhlí je dávkováno v ose reakční komory pádové trubky ve vzdálenosti 0,6 m od vstupu plynné směsi do pádové trubky a výstupní průměr sondy dávkující uhlí do reakční komory je $d = 5$ mm. Další okrajovou podmínkou je konstantní teplota povrchu pádové trubky $T = 1200$ K. Ostatní konstanty charakterizující palivo v obou modelech byly u obou programů ponechány ve výchozím nastavení.

S ohledem na nízké Reynoldsovo číslo byl k numerické simulaci proudění použit turbulentní $k - \varepsilon$ RNG model, který navíc řeší rovnice pro turbulentní kinetickou energii k a rychlost disipace ε [2], [3]. Dalším krokem je definování matematického modelu odplynění prchavé hořlaviny a spalování spalitelné frakce (vyhořívání fixního uhlíku).

Matematický model vyhořívání práškových uhelných částic v programu FLUENT 6.3.26

Problematiku proudění v pádové trubce lze charakterizovat jako stlačitelné proudění plynných složek (kyslík, oxid

uhličitý, dusík a prchavá hořlavina) a proudění pevných částic (práškové uhelné částice) v pádové trubce včetně uvažování přestupu tepla, radiace, odplynění prchavé hořlaviny a spalování spalitelné frakce uhelných částic. Pohyb pevných částic (práškové uhelné částice) je modelován v pojetí vícefázového modelu založeného na Lagrangeově přístupu. V Lagrangeově přístupu je plynná fáze uvažována jako kontinuum a pevné uhelné částice jako dispergovaná fáze. Definovaný matematický model představuje soustavu parciálních diferenciálních rovnic, které byly řešeny programem Fluent 6.3.26, založeném na metodě konečných objemů, kdy výpočetní oblast (v tomto případě pádová trubka) se vyplní elementy konečných prvků (šestistěny, čtyřstěny), v nichž se provádí numerická simulace definovaného modelu.

Matematický model definuje základní bilanční rovnice. Rovnice kontinuity

$$\nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokesovy rovnice

$$\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Rovnice energie

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \quad h = \sum_j Y_j h_j, \quad h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3)$$

$$\nabla(\rho \vec{v} Y_j) = -\nabla \cdot \vec{J}_j + R_j$$

Rovnice příměsí

$$\nabla(\rho(E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T - \sum h_j J_j + (\vec{\tau}_{eff} \vec{v})) \quad (4)$$

Rovnice pohybu pevných částic

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x}{\rho_p}(\rho_p - \rho) + F_x \quad (5)$$

Podrobný popis výše definovaných rovnic je uveden v [2].

V programovém prostředí software FLUENT 6.3.26 je několik modelů. V tomto příspěvku je použit jeden model odplynění prchavé hořlaviny a dva různé modely spalování spalitelné frakce, které jsou porovnány.

Matematický model odplynění prchavé hořlaviny - single kinetic rate model [3]

Rychlost odplynění prchavé hořlaviny je prvního řádu a závisí na množství zbývajících prchavé látky v částici. Rychlostní konstanta je definována Arrheniovým vztahem:

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})m_{p,0}] \quad (6)$$

kde $k = Ae^{(E/RT)}$ je rychlostní konstanta [s^{-1}], $f_{v,0}$ je podíl prchavé látky [%] v částici, $m_{p,0}$ je inicializační hmotnost částice [kg], m_p je hmotnost částice [kg]. Jako vstupy do matematického modelu byly definovány hodnoty $A = 312000 s^{-1}$, $E = 7,4 \cdot 10^7 J \cdot kmol^{-1}$, $f_{v,0} = 3,82$ %.

Matematický model spalování spalitelné frakce - diffusion-limited rate model [3]

Tento model předpokládá, že povrchová reakce probíhá rychlostí určující difúzi oxidantu do povrchu částice:

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{ox} T_{\infty} \rho}{S_b (T_p + T_{\infty})}, \quad (7)$$

kde $D_{i,m}$ - difúzní koeficient pro oxidant v proudovém poli [$m^2 \cdot s^{-1}$], Y_{ox} - lokální hmotnostní zlomek oxidantu v plynu [1], S_b - stechiometrický koeficient spalování uhlíku s kyslíkem, T_{∞} - místní teplota plynu [K]. Jako vstupy do matematického modelu byly definovány hodnoty $D_{i,m} = 4 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$, $S_b = 2.67$.

Matematický model spalování spalitelné frakce - kinetic/diffusion-limited rate model [3]

Tento model předpokládá, že rychlost povrchové reakce je definována buď Arrheniovým vztahem a nebo difúzí. Rychlost difúze je definována vztahem

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_{\infty})/2]^{0.75}}{d_p},$$

kde C_1 je limitní rychlostní konstanta difúze [s^{-1}]. Rychlost spalování pomocí Arrheniova vztahu je definována vztahem

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)},$$

Výsledná rychlost povrchové reakce je definována vztahem

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho R T_{\infty} Y_{ox}}{M_{w,ox}} \frac{D_0 R}{D_0 + R}, \quad (8)$$

kde A_p je plocha kulových částic [m^2], Y_{ox} je hmotnostní zlomek kyslíku [1], $M_{w,ox}$ je molární hmotnost kyslíku [$kg \cdot kmol^{-1}$]. Jako

vstupy do matematického modelu byly definovány hodnoty $C_1 = 5.10 \cdot 10^{-12} s^{-1}$, $C_2 = 0.002 s^{-1}$, $E = 7.9107 J \cdot kmol^{-1}$.

Z výsledků výpočtu vyplývá, že podle prvního zmiňovaného modelu vyhořívání fixního uhlíku („diffusion-limited rate model“) dojde k vyhoření uhelných částic ve 2,5 metru dlouhém úseku, tedy při rychlosti plynu $2 m \cdot s^{-1}$ během 1250 ms. U druhého modelu („kinetic/diffusion-limited rate model“) dojde k úplné oxidaci vzorku na úseku dlouhém 1 m, což při rychlosti reakčního plynu $2 m \cdot s^{-1}$ znamená, že částice vyhoří již během 500 ms (graf 1).

Matematický model vyhořívání uhelných částic v programu ANSYS

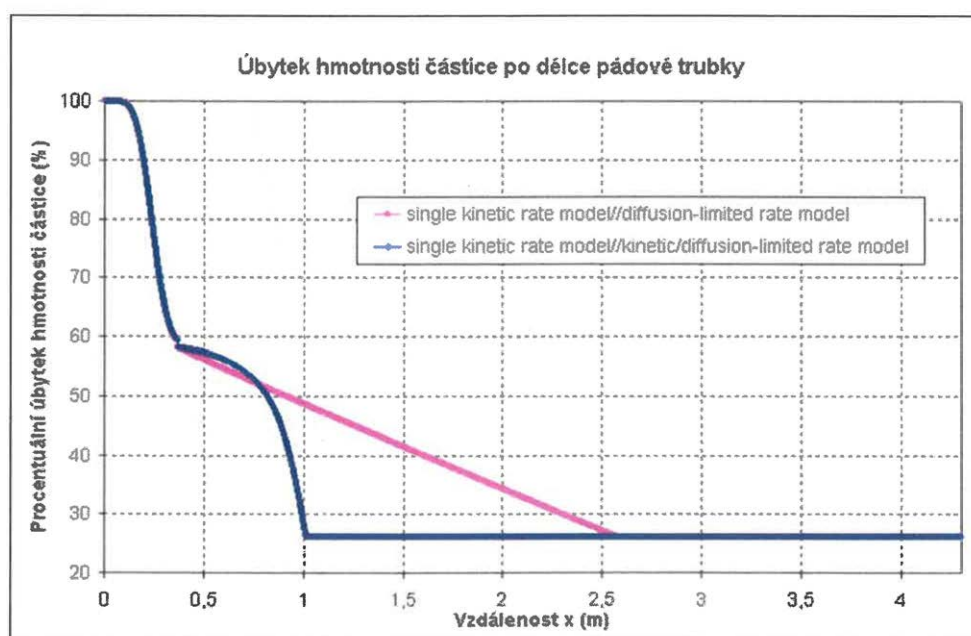
Jako druhý program pro modelování vyhoření uhelných částic byl použit program ANSYS verze 11.0. Tento program řeší odplynění prchavé hořlaviny stejným způsobem, jako program FLUENT 6.3.26 [2], [4]0.

Vyhořívání fixního uhlíku bylo počítáno podle modelu Field [4].

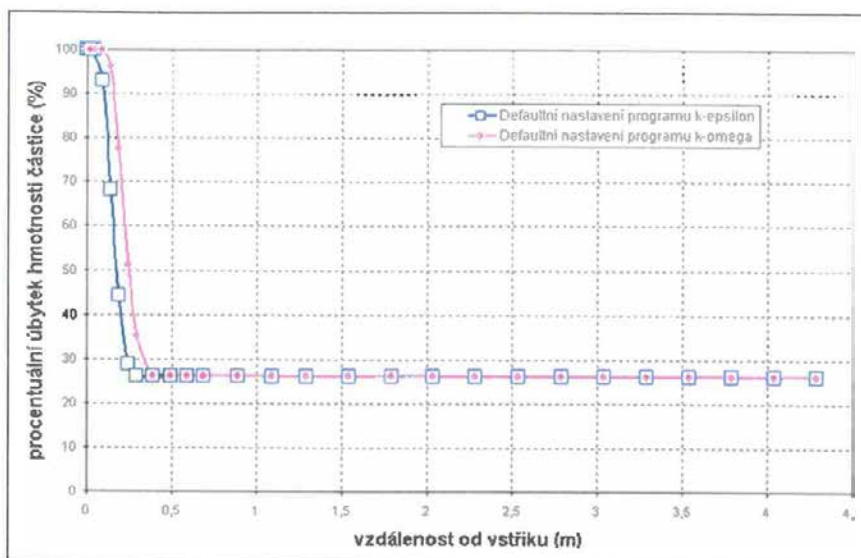
Míra difúze kyslíku je dána konstantou $k_d(P_g - P_s)$, kde je P_g je parciální tlak kyslíku ve spalínách daleko od hraniční vrstvy částice [Pa] a P_s je tlak kyslíku na povrchu částice [Pa]. Hodnota k_d je dána:

$$k_d = \frac{D_{ref}}{R_p} \left(\frac{T_p + T_g}{2T_{ref}} \right)^{\alpha} \frac{P_A}{P}, \quad (9)$$

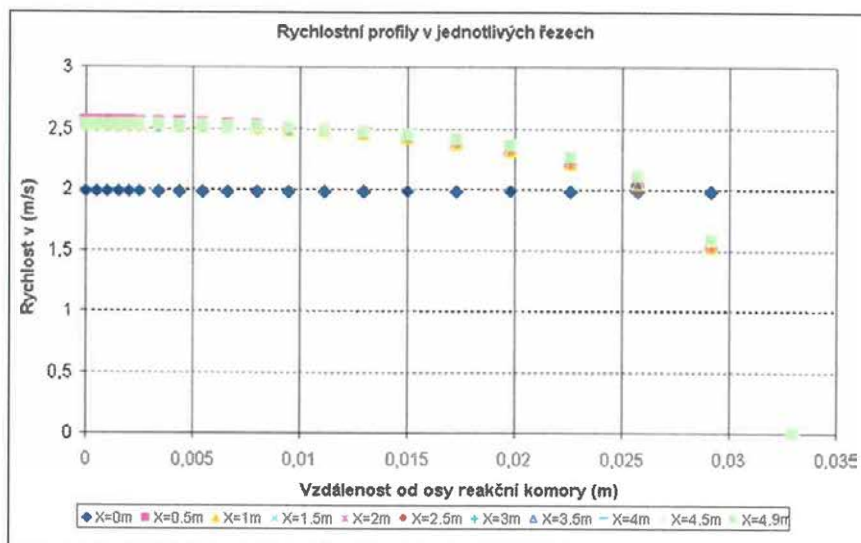
kde R_p je poloměr částice [m], T_p je teplota částice [K], T_g je teplota plynu ve vzdáleném poli [K], P je lokální tlak [Pa], P_A je atmosférický tlak [Pa], D_{ref} je dynamická difuzivita [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$], byla použita $D_{ref} = 1.8 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, T_{ref} je referenční teplota [K] (byla použita teplota 293 K) a α je exponent s hodnotou 0,75.



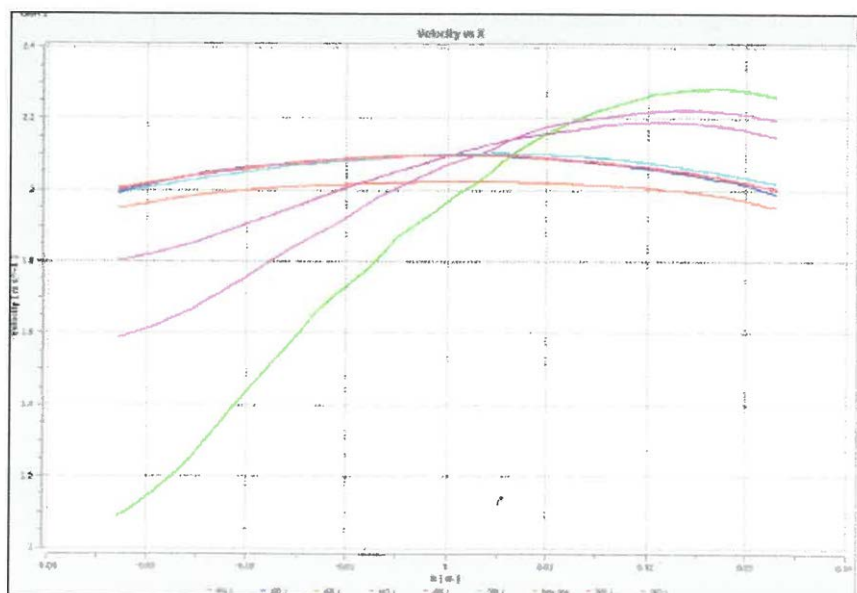
Graf 1: Vyhodnocení procentuálního úbytku hmotnosti částice práškového uhlí v programu FLUENT



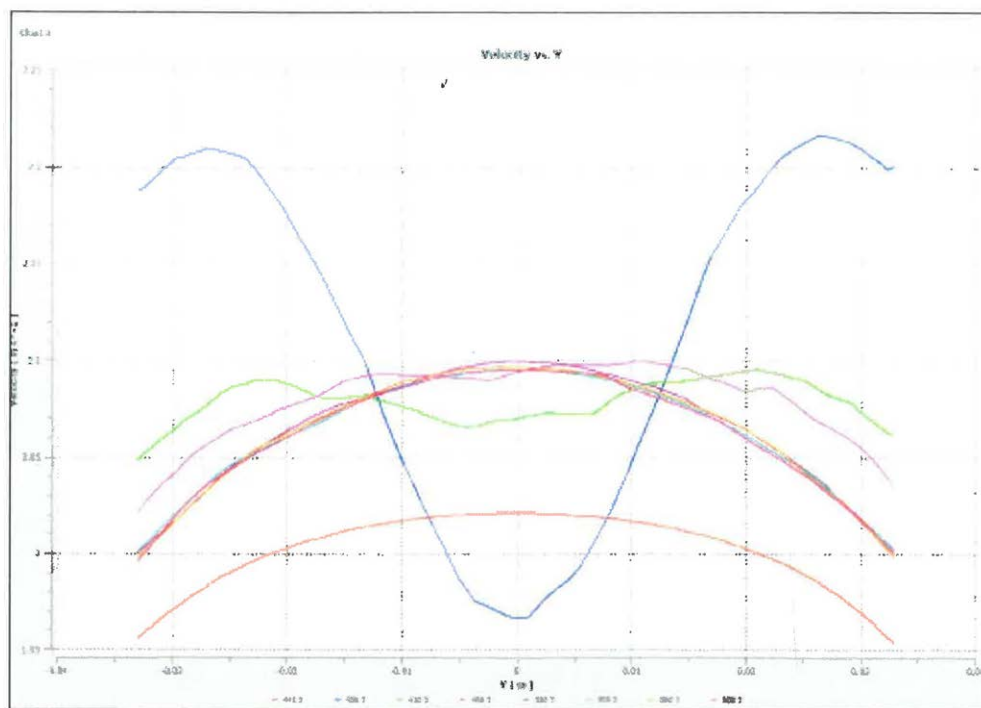
Graf 2: Vyhodnocení procentuálního úbytku hmotnosti částice práškového uhlí v programu ANSYS



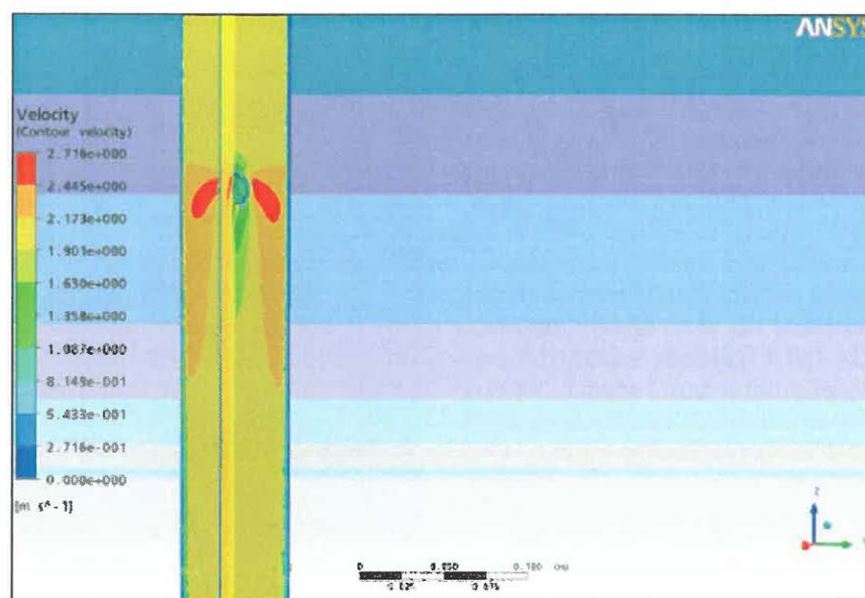
Graf 3: Rychlostní profil reakčního plynu modelu vytvořeného v programu FLUENT



Obr. 2: Rychlostní profily v úsečkách ve směru osy x



Obr. 3 Rychlostní profily v úsečkách ve směru osy y částice práškového uhlí v programu FLUENT



Obr. 4: Rychlost plynné fáze v blízkosti přívodu vzorku

Rychlost oxidace polokoksů na jednotku plochy povrchu částice je dán $k_c P_s$, Rychlostní konstanta k_c je dána:

$$k_c = A_c \exp\left(-\frac{T_c}{T_p}\right), \quad (10)$$

kde parametry A_c a T_c závisí na typu uhlí a jsou specifikovány jako vstupní parametry. Doporučené hodnoty pro A_c a T_c jsou $497 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a 8540 K . Pro tento model mají k_d a k_c jednotky $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$.

Všeobecná rychlost reakce částice polokoksů je popsána rovnicí [5]:

$$(k_d^{-1} + k_c^{-1})^{-1} \text{mol} \text{fr}_{\text{CO}_2} \frac{4\pi R_p^2 P}{P_A} \quad (11)$$

Na grafu 2 je vyhodnocen průběh vyhořívání uhelných částic v programu ANSYS 11.0. Byly použity výchozí okrajové podmínky, jak je již popsáno výše a defaultní nastavení ostatních konstant, které program používá pro výpočet. Jsou zde zobrazeny výsledky 2 modelů turbulentního proudění. Model k - epsilon, který byl použit také u programu FLUENT 6.3.26 a model k - omega. U obou modelů je zřejmý velmi rychlý úbytek hmotnosti částice oproti modelu v programu FLUENT 6.3.26. K úplnému vyhoření dojde u modelu k - epsilon

na 0,28 metru dlouhém úseku, tedy při rychlosti plynu 2 m.s^{-1} během 140 ms. U modelu k - omega má křivka vyhoření stejný průběh, je zde pouze posunut počátek vyhořívání o 0,07 metru, resp. 35 ms směrem dál od vstupu do reakční komory.

Rychlost proudění reakčního plynu v reakční komoře

Pro oba modely byla zadána jedna společná rychlost proudění reakčního plynu v reakční komoře 2 m.s^{-1} . Každý program k zadání této zásadní okrajové podmínky, která fakticky určuje dobu setrvání částice v reakčním prostoru, přistupuje jinak. Do programu FLUENT se zadává hmotnostní tok plynu, v našem případě $Q_m = 2,54 \text{ g.s}^{-1}$, který je pak přepočítán na střední rychlost plynu pro dané podmínky. Programu ANSYS postačuje zadání rychlosti v kartézské soustavě souřadnic ve směru osy Z a to již zmíněné 2 m.s^{-1} . Na obrázcích č. 2 až 4 jsou zobrazeny rychlostní profily reakčního plynu v jednotlivých úrovních po výšce pádové trubky.

Graf 3 zobrazuje rychlost plynu v reakční komoře o hodnotě 2 m.s^{-1} na vstupu do vlastní pádové trubky podle vzdálenosti od vstříku. Ihned po vstupu se vytvoří z důvodu nízkého Re čísla rychlostní profil souměrný podle osy z, který se blíží rychlostnímu profilu laminárního proudění. Skutečná rychlost plynu je tedy v blízkosti osy pádové trubky cca $2,5 \text{ m.s}^{-1}$, což je také oblast, ve které je unášena většina částic práškového uhlí. Na stěně reakční komory je nulová rychlost reakčního plynu.

Naproti tomu byla pro model pádové trubky v programu ANSYS vytvořena výpočetní síť reakční komory včetně vstříkovací sondy, která kontinuálně dává palivo do pádové trubky. Tento objekt stojící v cestě proudu plynu ovlivňuje jeho profil tak, jak je vidět na obr. 2 a 3.

Na těchto obrázcích je také patrný užší rozsah rychlostního profilu v rozmezí rychlostí $1,9$ až $2,1 \text{ m.s}^{-1}$. Úsečky jsou značeny dle polohy (tzn. úsečka 430 je u přívodu vzorku). Modrou čarou je vyznačen rychlostní profil v místě přívodu vzorku, kde dochází k největšímu ovlivnění proudění. Rychlost plynu v blízkosti přívodu vzorku je zobrazena také na obr. 4.

Závěr

Vyhoření uhelné částice bylo modelováno v pádové trubce, která je postavena na Výzkumném energetickém centru. Snahou autorů bylo modelovat vyhoření uhelné částice pomocí dvou programů (ANSYS a FLUENT) s použitím stejných vstupních parametrů. Každý program má svůj vlastní přístup k zadání vstupních dat a k výpočtu výsledného modelu jednotlivých procesů. Výsledkem jsou křivky vyhořívání, které mají velmi odlišné průběhy. Zatímco hodnota doby potřebné pro vyhoření uhelné částice dle programu Ansys je cca 0,14 s, program Fluent vypočetl dobu cca 0,5 a 1,25 s. Je zřejmé, že řádové rozdíly nejsou akceptovatelné a je nutné přistoupit k optimalizaci výpočtu. Optimalizace spočívá v úpravě vstupních parametrů na základě výsledků z reálných experimentů, což je vlastní cíl pádové trubky.

Tento příspěvek vznikl díky řešení projektu „Progresivní technologie a systémy pro energetiku“ – 1M 06059 programu MŠMT „Výzkumná centra“.

Literatura

[1] ŽIDEK, M., HORÁK, J., PALUSKA, R.: Zkušenosti s výstavbou pádové trubky. Sborník konference Energetika a životní prostředí 2008. VŠB-TU Ostrava.

[2] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TU, 2008, 154 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM).

[3] FLUENT: *Fluent 6.3.26 - User's guide*, Fluent Inc. 2003. VŠB-TU Ostrava. <URL:http://sp1.vsb.cz/DOC/Fluent_6.3.26/html/ug/main_pre.htm>

[4] ANSYS CFX Release Notes for 11.0. *Manuál k programu ANSYS*. 1996-2006 ANSYS Europe, Ltd.

[5] WALL, T. F., PHELAN, W. J., BARTZ, S.: "The prediction of scaling of burnout in swirled pulverised coal flames", International Flame Research Foundation Report F388/a/3 IJmuiden, The Netherlands, 1976.

Novinky ve Zpravodaji HNĚDÉ UHLÍ

Na internetových stránkách www.vuhu.cz v sekci Zpravodaj zveřejňujeme obsah jednotlivých čísel: názvy článků a abstrakty.

Články Zpravodaje jsou zařazeny do databáze **Index Copernicus International** (www.indexcopernicus.com) a v současné době probíhá jejich indexace ve vyhledávací vědecké literatuře **Google Scholar**. Věříme, že tento způsob prezentace přispěje k potenciálnímu zvýšení citační úrovně jednotlivých článků. Pro autory, kteří publikují nebo se chystají publikovat v našem časopise, je důležitá také informace o tom, že **Zpravodaj Hnědé uhlí je zařazen do Seznamu recenzovaných periodik vydávaných v ČR**, kterým není přidělen indikátor Impact Factor databáze WoS společnosti Thomson Reuters. Seznam tvoří 443 časopisů zahrnujících všechny obory a jejich zařazení bylo podmíněno splněním kritérií, která mimo jiné zahrnují např. požadavky na vydávání původních vědeckých a odborných prací, podmínku recenzování příspěvků nezávislými oponenty, cizojazyčnost abstraktů, dodržení složení redakční rady atd.

Rada pro VaV využívá tento seznam při hodnocení těch výsledků výzkumu a vývoje podporovaných z veřejných prostředků, které jsou vykazovány jako články v odborném periodiku.

(red.)