

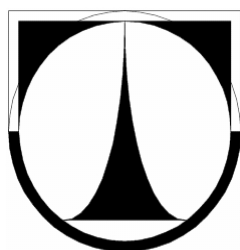
# 30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

*Jednotlivý příspěvek ze sborníku*



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Matematické metody spalování paliv a šíření požáru

Jaroslav KRUTIL<sup>1</sup>, Milada KOZUBKOVÁ<sup>2</sup>, Marián BOJKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ing. Jaroslav Krutil, VŠB-TU Ostrava, 17.listopadu 15/2172, 70833, Ostrava Poruba, jaroslav.krutil@vsb.cz

<sup>2</sup> prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc., VŠB-TU Ostrava, 17.listopadu 15/2172, 70833, Ostrava Poruba, milada.kozubkova@vsb.cz

<sup>3</sup> Ing. Bojko Marian, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, 17.listopadu 15//2172, 70833, Ostrava Poruba, marian.bojko@vsb.cz

**Abstrakt:** *Příspěvek představuje přehled základních metod matematického modelování hoření v aplikacích spalování paliv a šíření požárů v softwarovém prostředí ANSYS Fluent 12.1. Jsou analyzovány hlavní vlastnosti a provedeno srovnání jednotlivých modelů, které byly k modelování využity. Testovanými palivy byly, plynné palivo reprezentované spalováním metanu a pevné palivo, které bylo definováno drceným práškovým uhlím. Metody spalování paliv jsou rozebrány s aplikacemi na dokonalé a nedokonalé spalování. V závěrečné části příspěvku je rozebrán obecný požár definovaný pomocí zdroje tepelného výkonu.*

### 1. Spalování plynných paliv

Definice tohoto problému je velice složitý a obsáhlý proces, a proto je v rámci tohoto příspěvku prezentované testování spalování metanu se vzduchem pouze pomocí jedné stechiometrické rovnice pro dokonalé spalování. Spalovací rovnice pro dokonalé spalování metanu vypadá následovně:



V programu Fluent 12.1 existuje pět přístupů k modelování chemických reakcí v plynech, avšak protože byla testována úloha, která obsahuje oddělený vstup paliva a okysličovadla a řešeným prostorem proudí turbulentní proudění, vyplývají pro řešení následující úlohy tyto dva přístupy:

- obecný model proudění plynů s chemickou reakcí (species transport and chemical reaction model)

Model je založen na řešení transportních rovnic pro hmotnostní zlomky příměsi s definovaným reakčním mechanismem chemické reakce. Rychlosti reakce, která se objeví, jako zdrojové členy v rovnicích pro přenos příměsi jsou počítány v případech laminárního proudění z Arrheniových výrazů pro rychlost, v případech turbulentního proudění z modelu turbulentní (eddy) disipace

dle Magnussena Hjertagera nebo z EDC (Eddy-dissipation-concept) modelu.

- model spalování s nepředmísenými plyny (non-premixed model)

V tomto modelu jsou řešeny transportní rovnice pro jednu nebo dvě skalární veličiny (tj. hmotnostní zlomky směsi), a jednotlivé koncentrace složek ve směsi jsou odvozeny z předpokládaného statistického rozdělení hmotnostního zlomku směsi. Předpokládaná skalární veličina a efekty turbulence jsou popsány pomocí funkce hustoty pravděpodobnosti. Oby tyto použité modely budou detailněji rozebrány níže v kapitole spalování tuhých paliv.

### 2. Spalování tuhých paliv

Spalování uhlí je několikastupňový proces. Tyto stupně, které se částečně překrývají, závisí na vlastnostech uhlí, na procesních podmínkách, tj. na plynném médiu, konečné teplotě a reakční době. Jsou to tyto stupně:

- ohřev uhelné částice,
- uvolnění prchavých látek (sorpčně vázané plynné uhlovodíky),
- spalování prchavých látek,
- spalování polokoksu.

Reakce mezi diskretní fází pevných částic drceného práškového uhlí a kontinuální fází představovanou okolním médiem byly řešeny v softwaru Fluentu 12.1. Jelikož bylo drcené uhlí přiváděno do řešené oblasti odděleným vstupem, vyplynulo k řešení této problematiky použití modelu proudění částic s chemickou reakcí (species transport finite-rate/eddy-dissipation chemistry model) a nepředmíseného modelu (non-premixed model).

Oba přístupy byly testovány na totožné síti a geometrii, které jsou modelem skutečného zařízení pádové trubky umístěné ve výzkumném energetickém centru. Při testování byly definovány u obou metod totožné okrajové podmínky s veškerými teplotami v modelu, které do řešení zasahují. Totožné byly rovněž fyzikální vlastnosti vstupujícího média (okysličovadla) a vlastnosti vstupujících částic uhlí. Oba tyto zmíněné přístupy vyžadují velmi podrobnou analýzu o složení zkoumaného uhlí.

Tab. 1: Podrobná analýza drceného uhlí

Technická analýza drceného uhlí	
Složení uhlí	Procentuální vyjádření
<i>prchavá hořlavina</i>	26.27%
<i>popelovina</i>	21.27%
<i>spalovatelný uhlík</i>	51.23%
<i>vlhkost</i>	1.23%
Elementární analýza drceného uhlí	
Složení uhlí	Procentuální vyjádření
C	84.26%
H	5.26%
O	8.3%
N	1.36%
S	0.82%

K definici chemických reakcí zkoumaného uhlí bylo využito funkce Coal calculator. Tato funkce využívá informace o složení a analýze zkoumaného vzorku drceného uhlí k tvorbě stechiometrické rovnice spalování. Tato rovnice má následující tvar:

$$C_{1.33} H_{4.61} O_{0.45} N_{0.0859} S_{0.0226} + 2.28 O_2 \quad (2)$$

$$= 1.33 CO_2 + 2.30 H_2O + 0.0429 N_2 + 0.0226 SO_2$$

#### A) Model proudění částic s chemickou reakcí (finite-rate/eddy dissipation)

Pomocí tohoto modelu lze zadávat chemické reakce na uživatelem definovaných částicích. Nevýhodou tohoto modelování je obtížnost v zadávání. Veškeré reakce, příměsi a vlastnosti materiálu se zde musejí nastavit samostatně. Avšak takový výpočet je přesnější, oproti přednastaveným modelům, které ANSYS Fluent 12.1 obsahuje.

Tento model vyplývá z Euler – Lagrangeova přístupu, kde je tekutá fáze uvažována jako kontinuum a je řešena Navierovými – Stokesovými rovnicemi, zatímco dispergovaná fáze je řešena stopováním velkého počtu částic (bublin, kapek) v proudovém poli. Do řešeného prostoru je uhlí přivedeno pomocí funkce Injection, která umožňuje definovat všechny požadované vstupní parametry uhelného prachu. Tento model počítá přímo hmotnostní zlomek pro každý prvek, který vstupuje do chemické reakce a tím pádem je náročnější jak na čas výpočtu, tak i na výpočetní techniku.

#### B) Non-premixed model

U nepředmíseného spalování vstupuje palivo a okysličovadlo do reakční oblasti odděleně. Po zadání všech výše uvedených údajů a okrajových podmínek se u tohoto modelu vygeneruje PDF tabulka, která je po své generaci uložena pro případnou modifikaci. Další požadované informace, které tabulka PDF obsahuje jako například informace o chemických interakcích, které jsou definovány na základě vstupních vlastnostech uhlí a na teplotě okysličovadla a zadány pomocí Coal calculatoru. Termochemie je redukována na jednoduchý parametr tzv. Favre mean mixture (podíl směsi). Tento podíl směsi se označuje parametrem  $\bar{f}$  a vyjadřuje hmotnostní zlomek všech hořících a nehořících prvků proudícího

paliva ( $C$ ,  $H$ ,  $O$  atd.) a všech příměsích ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ , atd.). Tento přístup je elegantní a výrazně méně nákladný na výpočetní techniku, protože jsou jednotlivé produkty přepočítávané na základě určitého pravděpodobnostního modelu.

## 3. Obecný požár v uzavřeném objektu definovaný výkonem

Problematika numerické CFD simulace hoření a šíření požárů v uzavřených objektech je velmi složitý proces, který vyžaduje jak základní fyzikální znalosti o proudění s hořením, ale také i podrobné informace o daném objektu, jeho okrajových podmínkách a termofyzikálních vlastnostech použitých materiálů.

Matematické modelování požáru spočívá v řešení stechiometrických rovnic spalování přesně definovaného zdroje požáru (uhlí, dřevo, olej, plasty atd.). Při modelování požáru je mnohdy obtížné přesně specifikovat složení hořlavých látek. Proto se přístup k modelování zjednoduší tak, že zdroj požáru je definován objemem, ve kterém je definován:

- zdroj energie (přesněji tepelného výkonu) v rovnici energie a rovnici kontinuity
- zdroj hmotnostního zlomku v rovnici pro hmotnostní zlomek  $CO$ ,  $CO_2$ , páry  $H_2O$  a úbytek  $O_2$

Objemový zdroj hmotnosti (pro jednu i více příměsí) v rovnici kontinuity se definuje vztahem:

$$S_m = \frac{Q_m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

$Q_m$  - je hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$V$  - je objem [ $\text{m}^3$ ]

Analogicky lze definovat zdrojový člen v rovnici energie  $S_h$ , tedy zdroj tepelné energie za sekundu (tzv. tepelný výkon) vztažený k jednotkovému objemu se v rovnici energie definuje vztahem:

$$S_h = \frac{E}{t \cdot V} \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4)$$

kde:

$E$  - je energie [ $\text{J}$ ]

$t$  - je čas [ $\text{s}$ ]

$V$  - je objem [ $\text{m}^3$ ]

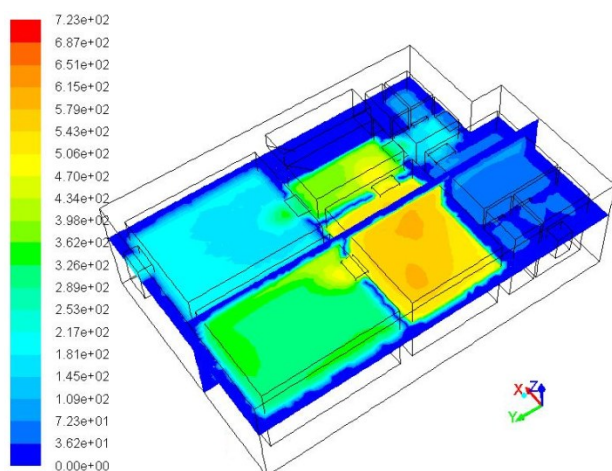
Velikost zdroje se určí z výhřevnosti paliv, spáleného množství v  $\text{kg}$ , hustoty a následně objemu. Takto určený výkon se přepočítá pro  $1 \text{ m}^3$ .

V případě rozšíření modelu o transport spalin je zdrojový člen (hmotnostní průtok spalin) navíc vložen stejným způsobem do rovnic pro hmotnostní zlomek  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  do rovnice energie. Tato úprava navíc upřesní vývin tepla. V případě zdrojů, jejichž parametry se mění v závislosti na čase (což je typické pro vyhořívání paliv), je možné závislosti zdrojů na čase popsat pomocí uživatelských funkcí UDF. Při správném zadání časově závislého výkonu bude tato funkce kopírovat průběh změny teploty v čase v blízkosti zdroje.

Při definování časové závislosti do UDF funkce je využita parametrizace úseček. Tato parametrizace spočívá v rozdělení křivky celkového výkonu na samostatné celky (úsečky). U každé z těchto úseček se za pomoci rovnice regrese získá jejich parametrická rovnice. Tímto způsobem lze dosáhnout velmi přesného popisu křivky pro celkový výkon. Výhodou funkce UDF je, že umožňuje zadání prakticky libovolného tvaru energetické křivky.



Obrázek 1: Pohled na zkoumaný objekt



Obrázek 2: Rozložení teplot v řešeném objektu

## 4. Závěr

Příspěvek se zabývá přehledem základních metod matematického modelování hoření v aplikacích spalování paliv a šíření požárů v programu ANSYS Fluent 12.1 přičemž metodika spalování paliv byla testována dříve a nyní se soustředím výhradně na šíření požáru. Všechny modely zmíněné v článku, byly ověřeny na základě dat získaných pomocí experimentů. Dále byly také některé vybrané veličiny vzájemně porovnávány. K využití výše uvedených modelů je potřeba nejen znalosti s oblasti proudění s hořením, ale také velmi dobré znalosti z oblasti chemie.

## 5. Literatura

- [1] ANGELIS, J., KUNDRATA, T., DVOŘÁK, O.: *Protokol o matematickém modelování č. 05/MOD/2010*. Praha, 2010, 10s.
- [2] Ansys, Inc. ANSYS FLUENT 12.1 - Theory Guide. 2010.
- [3] Ansys, Inc. ANSYS FLUENT 12.1 – UDF Manual. 2010.
- [4] Ansys, Inc. ANSYS FLUENT 12.1 - User's Guide. 2010.
- [5] Ansys, Inc. ANSYS FLUENT 12.1 - Tutorial Guide. 2010.
- [6] DVOŘÁK, O., DUDÁČEK, A.: *Zpráva o výsledcích požární zkoušky v rodinném domku v Bohumíně dne 19. 11. 2009*. Praha, Ostrava: květen 2010. TÚPO MV-GŘ HZS PRAHA a FBI VŠB-TU OSTRAVA, 2010, 51s.
- [7] DVOŘÁK, O. a kol. *Vývoj a validace požárních modelů pro stanovení vývinu/šíření tepla a kouře, toxických plynů, tlakových vln pro simulaci/interpretaci scénářů požárů/výbuchů a jejich ničivých účinků. IZávěrečná výzkumná zpráva o výsledcích řešení dílčího výzkumného úkolu DVÚ č. 2 výzkumného projektu VD20062010A07I*. Praha: MV-GŘ HZS ČR, TÚPO, únor 2011, 141 s.
- [8] KOZUBKOVÁ, M.: *Numerické modelování proudění FLUENT I. [Online]*. c2003. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 116 s, poslední revize 6.1.2005, Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>>.
- [9] PALUSKA, R., BOJKO, M., HORÁK, J. Determination of pulverized coal thermokinetic properties. In *Conference Proceedings of International Scientific Conference JUBILEUSZOWA KONFERENCJĘ KOTŁOWĄ 2009*, Gliwice : Politechnika Śląska Gliwice, 2009, s. 277-286, ISBN 978-83-927340-1-7.
- [10] PALUSKA, R., BOJKO, M., HORÁK, J. Determination of pulverized coal thermokinetic properties with use of mathematical modelling. *Sborník vědeckých prací VŠB - TU Ostrava, řada strojní*, 2009, č. 3, s. 149-158, ISSN 1210-0471.