

Modelování rizikových stavů v rodinných domech

Milada Kozubková¹, Marián Bojko², Jaroslav Krutil³

- ¹ Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, milada.kozubkova@vsb.cz
- ² Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, marian.bojko@vsb.cz
- ³ Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, jkrutil@seznam.cz

Abstrakt Příspěvek představuje řešení rizikových stavů vzniku požáru a výbuchu v rodinných domech s využitím software ANSYS FLUENT. V práci, jsou srovnávány přístupy a možnosti matematického modelování takovýchto stavů. Jsou analyzovány dva základní modely. Model využívající řešení stechiometrických rovnic během hoření a model, který řeší hoření za pomoci definování zdroje tepelného výkonu.

1 Úvod

Tvorba matematických modelů rizikových stavů vychází z experimentů pracovišť FBI a TÚPO. Zdrojem informací pro tuto práci jsou požární zkouška realizována v bývalém rodinném domě v Bohumíně [1] a požární zkouška v rodinném domku v Kamenné u Milína [2]. První zmíněná zkouška se zabývá obecným požárem a jeho šíření v uzavřené oblasti. Zatím co zkouška v Kamenné se zabývá výbuchem plynné směsi.

2 Přístupy k modelování

Je potřeba říct, že v příspěvku se zabývám pouze samotným modelováním hoření. Proto v této práci nezmiňuji modely popisující, proudění, radiaci, přestup tepla atd. V programu ANSYS FLUENT 13.0 existují k modelování takovýchto stavů dva základní přístupy:

2.1 Modelování požáru jakožto zdroje chemické reakce spalování za přítomnosti tepla a chemických látek.

Použití tohoto přístupu je podmíněno dokonalou znalostí stechiometrické rovnice, chemického procesu probíhajícího během spalování chemických látek a podrobné informace o fyzikálních, chemických a kinetických vlastnostech látek účastnících se samotného chemického děje. Využití tohoto přístupu doporučuje zejména tam, kde lze chemickou reakci definovat velmi jednoduchým způsobem, tj. za pomoci malého počtu rovnic [3], [4].

Matematický model řešení rovnic pro přenos jednotlivých chemických látek s chemickou reakcí

ANSYS FLUENT počítá s „časově středovanými hodnotami lokálních hmotnostních zlomků chemických látek“ \bar{Y}_i . Ty jsou popsány podobnou bilanční rovnicí, jako je tomu například u rovnice energie. Je využito vztahu, který má tento tvar [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i Y_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{J}_{i,i} + R_i + S_i \quad (1)$$

kde \bar{u}_i je časově středovaná složka rychlosti proudění, R_i je rychlost produkce chemických látek i vlivem chemické reakce a S_i rychlost tvorby přírůstku z distribuované fáze. Zmíněná rovnice (1) platí pro $N-1$ složek, kde N je celkový počet chemických látek dané fáze v soustavě.

Modely popisující rychlosti produkce jednotlivých chemických látek

K řešení rychlosti produkce chemických látek i' vlivem chemické reakce lze v programu ANSYS FLUENT využít následující turbulentní modely:

Laminar finite-rate model (laminární model) – tento model neuvažuje s účinky turbulentních fluktuací. K určení rychlosti chemické reakce je využito Arrheinova vztahu. Model je dostatečně přesný pro spalování s relativně pomalou dobou vlastní chemické reakce a zanedbatelnými turbulentními fluktuacemi jako je nadzvukové hoření. Zdrojový člen R_i z důvodu chemické reakce v rovnici pro složku i' je počítán jako součet N_R reakčních zdrojových členů chemických látek, které se na reakci podílejí

$$R_{i'} = M_{i'} \sum_{k=1}^{N_R} (v''_{i',k} - v'_{i',k}) \left(\underbrace{A_k T^{\beta_k} e^{-\frac{E_k}{RT}}}_{k_{f,k}} \prod_{j'=1}^N [C_{j'}]^{\eta'_{j',k}} - k_{b,k} \prod_{j'=1}^N [C_{j'}]^{\eta''_{j',k}} \right) \quad (2)$$

kde je N počet chemických látek, $v'_{i',k}$ stechiometrický koeficient pro reaktant i' v k -té reakci, $v''_{i',k}$ stechiometrický koeficient pro produkt i' v k -té reakci, $M_{i'}$ je molární hmotnost chemické látky i' , $k_{f,k}$ rychlostní konstanta pro k -tou přímou reakci, $k_{b,k}$ rychlostní konstanta pro k -tou zpětnou reakci, $C_{j'}$ látková koncentrace všech reaktantu a produktu chemické látky j' v k -té reakci, $\eta'_{j',k}$ rychlostní exponent pro reaktant a produkt j' v k -té přímé reakci, $\eta''_{j',k}$ rychlostní exponent pro reaktant a produkt j' v k -té zpětné reakce, A_k pre-exponenciální faktor Arrheniova výrazu, β_k je teplotní exponent, E_k aktivační energie reakce, R univerzální plynová konstanta a T je teplota. Reakce může probíhat v homogenní fázi, mezi fázemi jednotlivých chemických látek, nebo na povrchu, jehož výsledkem je usazování nebo vznik fáze [3], [4].

Eddy-Dissipation model (turbulentní model) – probíhá-li chemická reakce velmi rychle, je celková rychlost reakce řízená turbulentním směřováním a nevyužívá se Arrheinova vztahu. Tento model je vhodný pro reakce prvního nebo druhého řádu. V podstatě rozlišujeme dva hlavní typy reakcí, s předmíšenými a nepředmíšenými reaktanty. Eddy-Dissipation model nabízí model chemické turbulentní interakce založený na Magnussen a Hjertager. Střední rychlost chemické reakce tvorby produktu i' -té chemické látky v k -té reakci je dána menší hodnotou ze dvou vyjádření

$$R_{i'} = M_{i'} \sum_{k=1}^{N_R} \min \left\{ v'_{i',k} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v_{R,k} M_{i',R}} \right), v'_{i',k} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_{j'} v''_{j',k} M_{j'}} \right\} \quad (3)$$

kde Y_P je hmotnostní zlomek jednotlivých produktů chemických látek (P), Y_R je hmotnostní zlomek konkrétních reaktantů (R), A je empirická konstanta (rovna 4) a B je empirická konstanta (rovna 0,5). Hustota je ρ i' -té chemické látky. Rychlost chemické reakce je řízená časovým

měřítkem k/ε směřování velkých víru na základě Spaldingova modelu eddy-breakup (rozpad víru). Proces chemické reakce probíhá, jestliže je proudění turbulentní tzn. ($\varepsilon/k < 0$) [3], [4].

Finite-rate/Eddy-Dissipation model (kombinovaný model) – jedná se kombinaci předešlých dvou modelů. U tohoto modelu se rychlost chemické reakce určí jak podle Arrheinova vztahu tak podle Eddy-Dissipation rovnice. Lokální rychlost reakce je daná minimální hodnotou z těchto dvou rovnic. I když software FLUENT umožňuje řešit několika stupňové reakční mechanismy pro Eddy-Dissipation a Finite-Rate/Eddy-Dissipation model, u reakčních mechanismů vyšších řádů nelze očekávat příliš přesné výsledky. Je to způsobené tím, že několika stupňové reakční mechanismy jsou postaveny na Arrheniových rychlostech, které jsou pro každou reakci rozdílné. V Eddy-Dissipation modelu mají všechny reakce stejnou rychlost, a proto by měl být model použit jen pro jednokrokové nebo dvoukrokové obecné rovnice [3], [4].

Eddy-Dissipation-Concept model tzv. EDC (EDC turbulentní model) - model zahrnuje velmi podrobnou kinetiku spalování ve vzniklém plamenu a je vněm zahrnuta kinetika několika krokového chemického mechanismu. Model předpokládá vznik chemických reakcí, jejichž děj probíhá v malých turbulentních strukturách nazývaných fine scaled [4]. Vlivem chemické reakce pro chemickou látku i' je zdrojový člen $R_{i'}$ zahrnut do rovnic energie a počítá se pomocí vztahu (4), kde $Y_{i'}$ je hmotnostní zlomek chemické látky i' , $Y_{i'}^*$ hmotnostní zlomek chemické látky i' pro fine scaled, C_ξ je konstanta objemového zlomku (2,1377), C_r je konstanta časového měřítka (0,4082), ν je kinematická viskozita [3], [4]:

$$R_{i'} = (Y_{i'}^* - Y_{i'}) \left(\frac{\rho C_\xi^2 \left(\frac{\nu \varepsilon}{k^2} \right)^{1,5}}{C_r \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}} \left[1 - \left(C_\xi^3 \left(\frac{\nu \varepsilon}{k^2} \right)^{2,25} \right) \right]} \right) \quad (4)$$

Pokud je chemická reakce příliš rychlá, tento model pak využívá tzv. STIFF mechanismu. Jedná se o pomocný mechanismus, který v sobě zahrnuje konstanty aktivační energie a pre-exponenciálního faktoru.

2.2 Modelování požáru jakožto zdroje tepla a zplodin.

Tento přístup modeluje hoření bez zahrnutí chemické reakce a to s ohledem na složité úlohy, kde by bylo definování chemické reakce velmi problematické. Jedná se o přístup, který definuje přímou hodnotu tepelného výkonu zdroje tepla a hlavních složek toxikantů, které při hoření vznikají a jejichž přítomnost v okolním ovzduší byla zjištěna z experimentu do předem definovaného objemu. Tuto variantu řešení lze využít tam, kde předchozí přístup z důvodu složité chemické reakce nelze použít, například obecné hoření různorodých látek [5].

Matematický model zdroje energie a spalin

Do rovnice kontinuity se definuje objemový zdroj hmotnosti (pro jednu i více složek) tímto vztahem:

$$S_m = \frac{Q_m}{V} \quad (5)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok $[kg/s]$ a V je objem $[m^3]$.

Zdrojový člen S_h v rovnici energie se definuje analogicky. Tedy zdroj tepelné energie za jednotku času (tzv. tepelný výkon) vztažený k jednotkovému objemu:

$$S_h = \frac{E}{t \cdot V} \quad (6)$$

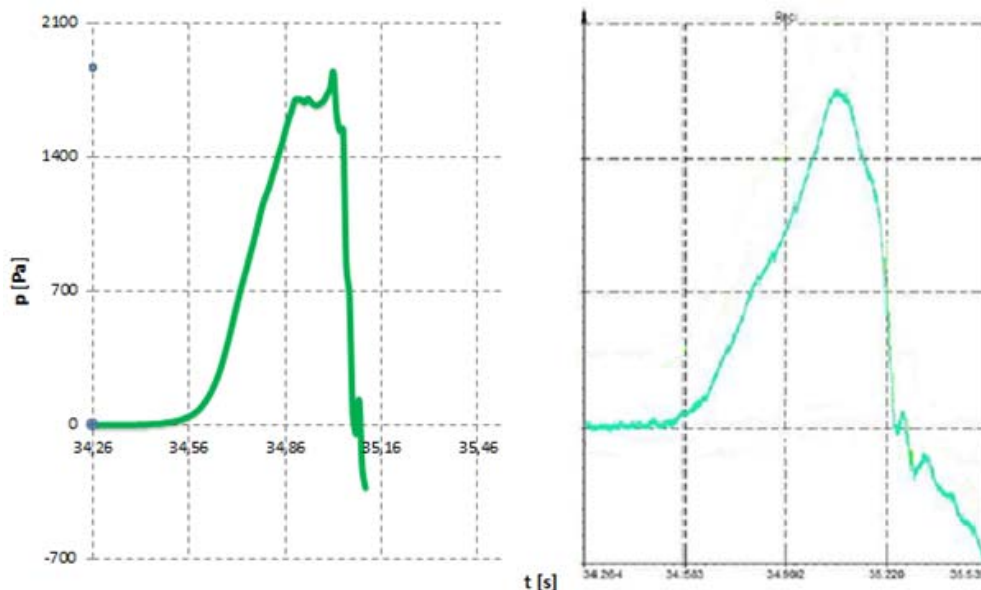
kde E je energie [J], t je čas [s] a V je objem [m^3].

Velikost takového zdroje se určí z výhřevnosti paliv, spáleného množství v kg, hustoty a následně objemu. Takto určený výkon se přepočítá pro $1m^3$. Pokud je navíc model ještě rozšířen o transport spalin je zdrojový člen (hmotnostní průtok spalin) navíc vložen obdobným způsobem do rovnic pro hmotnostní zlomek CO_2 , CO , O_2 do rovnice energie. Pokud je potřeba řešit zdroje, jejichž parametry se mění v závislosti na čase (pro vyhořívání paliv je to typické), je možné využít uživatelských funkcí tzv. UDF (User-Defined Function).

3 Experimenty a výsledky

3.1 Řešení vzniku a šíření výbuchu a výbuchového tlaku

Problematika modelování výbuchu je velmi složitá a v programu ANSYS FLUENT existuje několik možných přístupů k její realizaci (akustický model, řešení pomocí přetlakového signálu, model využívající chemických reakcí). V tomto případě, kdy dochází ke generaci tlakové vlny v důsledku hoření plyné směsi, přichází v úvahu pouze možnost s využitím obecného modelu proudění plynů s chemickou reakcí (species transport and chemical reaction model).

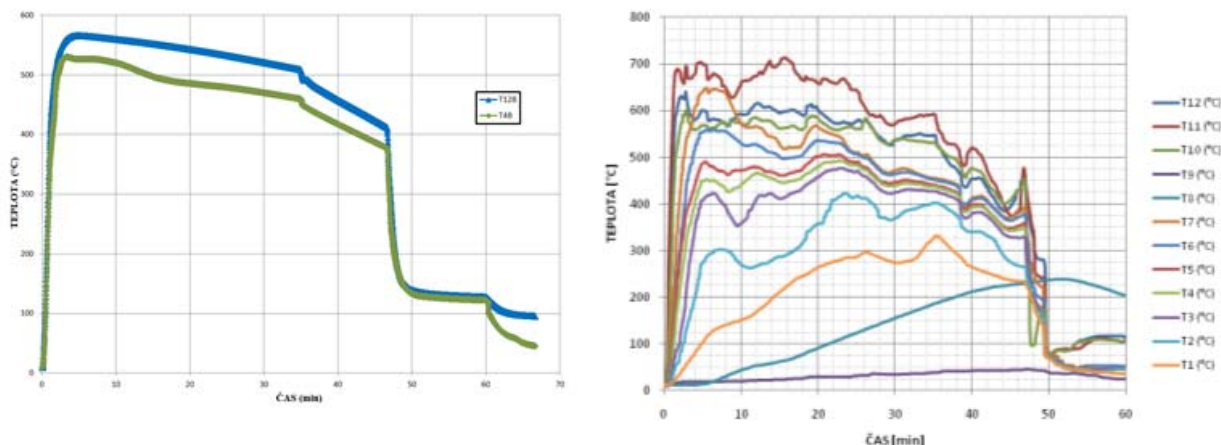


Obr. 1 Srovnání tlakového průběhu (vlevo numerická simulace vpravo experiment).

3.2 Řešení vzniku a šíření požáru

Jak už bylo zmíněno výše, je řešení vzniku a šíření požáru velice problematické a s využitím varianty využívající modelování hoření jakožto zdroje chemické reakce téměř nemožné. Proto tedy k řešení takovéto úlohy přichází v úvahu pouze varianta s využitím zdroje tepla a zplodin.

Celková měrná energie hraniček dřeva vztažená k objemu $1 m^3$ zadávaná do softwaru byla stanovena pomocí empirických vztahů na hodnotu $E_{C,F}=167851,11W \cdot m^{-3}$. Pro zadání časově závislé měrné energie bude tato funkce kopírovat průběh změny teploty v čase v blízkosti zdroje získané z požární zkoušky popisující tento průběh následovně: vznícení, hoření, prudké ochlazení vlivem úbytku spalovaného materiálu a následné dohořívání.



Obr. 2 Průběh teploty v závislosti na čase (vlevo numerická simulace vpravo experiment).

4 Závěr

V práci jsou popsány možnosti matematické modelování hoření a explozivní hoření v rodinných domech s využitím programu ANSYS FLUENT. Práce popisuje výhody a nevýhody modelů schopných modelovat tyto rizikové stavy. Jsou zde popsány dva základní modely: model definující hoření pomocí stechiometrie a model definující požár pomocí zdroje tepelného výkonu. Oba tyto modely zmíněné v článku, byly ověřeny na základě dat získaných pomocí experimentů. K využití výše uvedených modelů je potřeba nejen znalosti s oblasti proudění s hořením, ale také velmi dobré znalosti z oblasti chemie.

Literatura

- [1] 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.
- [2] DVOŘÁK, O., DUDÁČEK, A.: *Zpráva o výsledcích požární zkoušky v rodinném domku v Kamenné u Milína dne 8. 10. 2010*. Praha, Ostrava: listopad 2010. TÚPO MV-GŘ HZS PRAHA a FBI VŠB-TU OSTRAVA, 2010, 30s.
- [3] KOZUBKOVÁ, M., BOJKO, M., ZAVILA, O.: *Zpráva řešení modelování požáru daného tepelným výkonem a chemickou reakcí*. Ostrava, 2009, 45s.
- [4] Ansys, Inc. ANSYS FLUENT 12.1 - *Theory Guide*. 2010.
- [5] 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>>.

