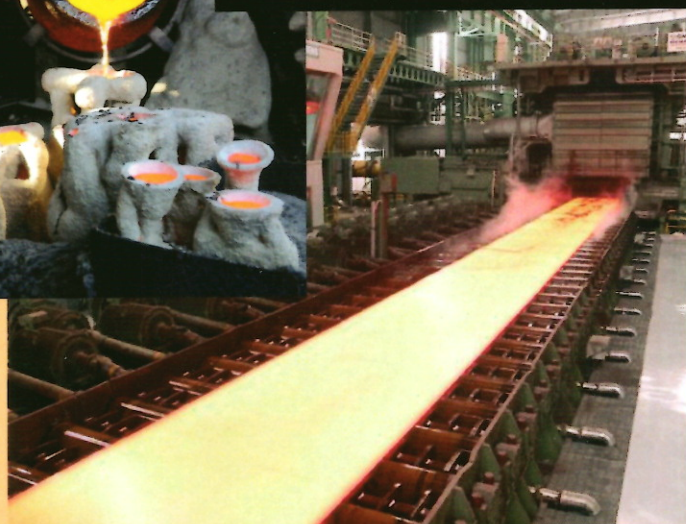
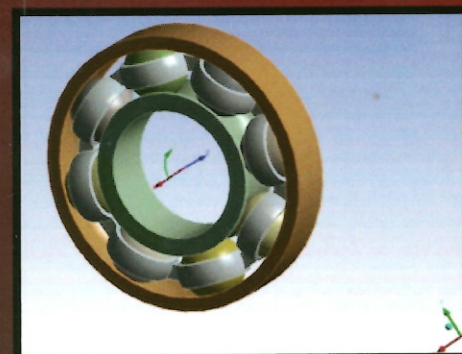
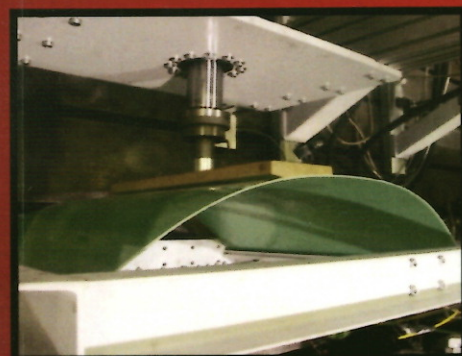
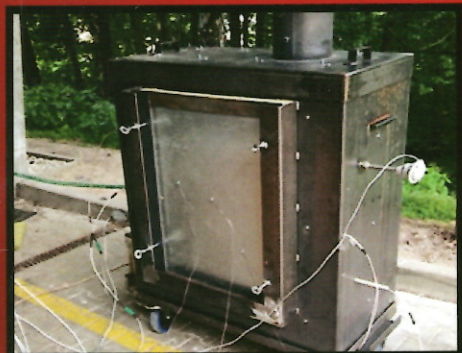
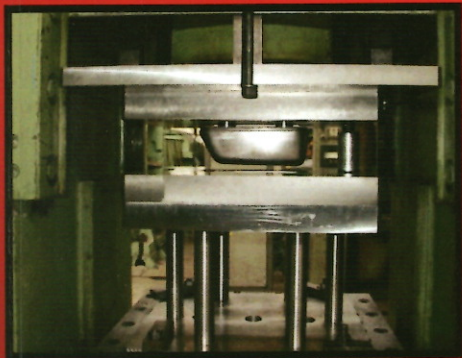




TECHNOLÓG





ISSN 1337-8996

Numerické modelování a měření žáruvzdorných materiálů pro výplně požárních uzávěrů

Tomáš Martinec, Ing., PhD.*

CXI, TUL Liberec,
Studentská 1402/2, 460 01 Liberec 1.
E-mail: tomas.martinec@tul.cz ,Tel.: + 420 485353526

Michal Petru, doc. Ing., PhD.

CXI, TUL Liberec,
Studentská 1402/2, 460 01 Liberec 1.
E-mail: michal.petru@tul.cz ,Tel.: + 420 485353833

Petr Kulhavý, Ing.

CXI, TUL Liberec,
Studentská 1402/2, 460 01 Liberec 1.
E-mail: petr.kulhavy@tul.cz ,Tel.: + 420 485353321

Numerical modeling and measurement of fireproof materials for resistance panels of fire doors

Abstract: Testing of the fire doors is very challenging due to the requirements of the standards. It is necessary to carry out a series of time-consuming and costly tests for certification. This article focuses on modeling the behavior of fire doors during a fire, allowing you to achieve the desired properties more quickly and, in particular, to test the fire resistance and smoke tightness virtually on the model. The advantage of using the described methods is in particular financial savings in the innovation of existing doors or in the development of new door types. The results of the numerical simulations are also confronted with the results of the real-world tests.

ÚVOD

Požární uzávěry (dveře) se instalují v požárně dělících konstrukcích, které ohraničují samostatné požární úseky. Tato konstrukce poté brání šíření požáru z jednoho požárního úseku do druhého [1]. Například při požáru bytu teplota stoupne z 20°C během 15 minut na cca 840 °C a během další doby narůstá až na cca 1150 °C (vždy v závislosti na množství, charakteru hořlavých látek a přístupu kyslíku). Pro vytvoření bezpečných podmínek evakuace osob z objektu se navrhuje úniková cesta a ta se odděluje od ostatních prostorů objektu (jiných požárních úseků), požárními uzávěry, které brání proniku tepla a případně zakouření. Důležitým parametrem požárních uzávěrů je tedy zejména jejich schopnost minimalizovat přenos tepla konvekcí i radiací ze strany požáru na studenou stranu a vydržet odolávat požáru po deklarovanou dobu [2]. Hodnocení požárních uzávěrů se v České republice od 1.10.2000 řídí zejména podle ČSN EN 1634-1, ČSN EN 1363-1, ČSN EN 1363-2. Norma definuje tři druhy zkoušek (požární odolnost, kouřotěsnost a

posouzení mechanických vlastností). Dále definuje tři druhy podpěrných konstrukcí a nutnost zkoušet uzávěry v kombinaci s různými konstrukcemi. Navíc asymetrické uzávěry je nutné zkoušet z každé strany zvlášť. Zkouší se výrobky ve skutečné velikosti (do rozměrů pece, obvykle 3x3m), extrapolace výsledků je možná jen v omezené míře. Všechny zkoušky jsou pro zkoušený výrobek destruktivní. Zkoušení výrobku je proto velmi časově i finančně náročné (jedná se řádově o stovky tisíc korun). Zejména pokud je nutné zkoušky opakovat z důvodu chyb v konstrukci uzávěru nebo z důvodu použití nevhodných materiálů. V současné době se při konstrukci používají moderní CAD nástroje, které umožňují spočítat řadu charakteristik výsledného uzávěru ještě před jeho výrobou. Nedokáží ale simulovat průběh požáru a reakci konstrukce na extrémní a nerovnoměrné teplotní zatížení s definovaným časovým průběhem. Nedokáží také simulovat chování kouře a plamenů, které je důležité při posuzování průběhu zkoušky. Jako hlavní problémy, které v podstatě řeší všichni výrobci protipožárních dveří, se jeví především deformace

dveřních křídel (případně lamel u rolovacích vrat) vysokou teplotou a s deformací související vzniklá průniková místa pro kouř a plameny, která se vytvoří především v rozích dveřního křídla a v místech vsazení dveřní kliky (případně v prostoru mezi lamelami). Během zkoušky v certifikované laboratoři je vzorek dveří vystavený rostoucí teplotě, která se řídí křivkou dle požadavků normy [3]. Zaznamenávají se hodnoty teplot vně uzávěru, tepelný tok vně uzávěru a průhyb [1, 14]. Výsledky testu jsou následně klasifikovány podle normy do kategorií podle jejich mezních stavů, které buď zabraňují (EI), nebo snižují (EW) šíření ohně přinejmenším po deklarovaný čas v minutách (15-90min). Tuto dobu bohužel v současné době prakticky není možné odhadnout předem. Proto je jen velmi obtížné optimalizovat konstrukce pro vysokou protipožární ochranu a kouřotěsnost nebo konstruovat například levnější variantu uzávěru s nižší odolností pro zákazníky, kteří nemají na protipožární odolnost tak vysoké nároky.

MODELOVÁNÍ PLAMENE

Tento článek je zaměřen na numerické a experimentální studium tepelného přenosu ve zkoušeném materiálu, který je uvnitř izolované zkušební komory zatěžován pomocí hořáku s propan-butanem. Řešení podobného problému vyžaduje současně použití několika disciplín. Nejprve je třeba se seznámit s dostupnými standardy – znát podmínky testování a hodnocení výsledků. To je popsáno v příslušných normách [3] a je potřeba k popsaným procedurám přihlížet, aby bylo možné se přiblížit k podmínkám pro konečnou certifikaci. Celkový popis požáru, spalování a chování konstrukcí vystavených extrémnímu tepelnému zatížení poskytují autorům knihy jako např. [1].

Při studium numerického modelování spalovacích procesů a šíření požáru se můžeme setkat jak s klasickým přenosem tepla [2, 4, 5, 6], tak i s transientními turbulentními proudovými modely. Existuje několik používaných modelů, založených na Navier-Stokesových rovnicích, které lze použít [7, 8]. K jejich specifickým aplikace a popisu použití tzv. Eddy modelu, který je nejvhodnější pro časově nestabilní procesy s množstvím turbulencí, bylo napsáno velké množství článků, např. [8, 9, 10]. Pro správné nastavení modelu a zejména pro definici reakčních médií (vzduch, plyn), je velmi důležité vycházet ze základů chemie, která definuje vazební síly [6, 11] a vytvořené prvky. Konečný model plynných složek tvořený částicemi podílejícími se na reakci a jejich statistická distribuce je popsána v [12, 13]. Celkově problém přesahuje jednoduchou mechanickou definici vlastností materiálu a geometrie. Nejjednodušším přístupem k modelování

spalování je využití semiempirické korelace, Moodyho diagramu nebo více sofistikovanější metody jako je např. Reynoldsovo průměrování.

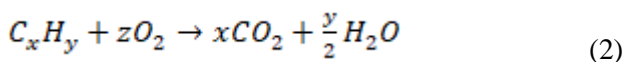
$$\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\tau) d\tau \quad (1)$$

Kde f je průměr z určitého množství a T časový interval výrazně delší, než časová měřítka daného turbulentního toku. Při aplikaci průměrování do pohybových rovnic, dostaneme tzv. Reynolds-averaged Navier-Stokes rovnice (RANS), jenž popisují změny ve sledovaných veličinách. K použití je celkem široká nabídka modelů tzv. Reynoldova napětí od jednoduchých algebraických modelů, modelů $K-\epsilon$ až po algebraické vyjádření Reynoldsových napětí. V našem případě použitý software PyroSim (Fire Dynamics Simulator od společnosti NIST) využívá k řešení Navier-Stokesových rovnic simulační metodu tzv. Large Eddy, jejíž výsledky jsou závislé na čase a liší se tedy v každém okamžiku. Zde je důležitý rozdíl např. oproti Reynolds-averaged Navier-Stokes rovnicím, které poskytují řešení pouze pro jediný časový okamžik. Large-eddy simulace (LE) je technika někde mezi simulací přímou a Reynolds-averaged rovnicí. V LE je příspěvek velkých energií přenášejících struktur počítán přímo a pouze efekt turbulencí v malých měřítkách je modelován. LE simulace vycházejí z předpokladu, že jevy v “malých měřítkách” jsou více izotropní a méně ovlivňují okrajové podmínky, než jevy v měřítkách velkých. Součástí problému je i definice použitého paliva. V našem případě byl vytvořen model spalování, předem nepromíchané směsi propan butanu (C_3H_8 , C_4H_{10}). Hořlavé plyny jsou obecně chemickou směsí přírodních plynů. Jejich složení sice závisí na místě těžby, ale jejich vlastnosti se prakticky neliší. I přesto, že jejich složení se může lišit významně, primární vlastnosti jsou stále velmi podobné. V našem případě byl použit zkapalněný plyn, směs propanu a butanu. Tyto plyny jsou bezbarvé, náležící do skupiny uhlovodíkových plynů s obsahem tří až čtyř atomů uhlíku v molekule. Svojí výhřevností (více než 20.93 MJ m⁻³) se řadí do skupiny tzv. Vysoce výhřevných paliv. Při 0°C a 101,08 kPa je měřená výhřevnost rovna 46,1 MJ m⁻³.

Tab. 1 Složení LPG

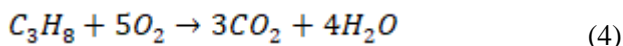
Propan-butan	propane	butane
Chemický vzorec	C3H8	C4H10
Molekulová hmotnost	44,094	58,12

Spalování je obecně chemicko fyzikální proces, při kterém palivo je mícháno s oksyličovadlem, v našem případě tedy LPG a kyslík. Obecná stochiometrická rovnice uhlovodíkového plynu, která může být v tomto případě použita je:



Kde:
$$z = x + \frac{1}{4}y \quad (3)$$

Což pro propan s kyslíkem dává:



Oproti klasickým výpočtům, např. mechaniky tuhých těles či jednoduchého nestlačitelného proudění, se při modelování plynů výrazně dotýkáme i jiných oborů, jako je fyzika částic a molekulová chemie. Dokud totiž samotné palivo v našem případě plyn přesně neznáme a nenadefinujeme již včetně uspořádání a pohybu elektronů v atomech a molekulách, jenž výrazně ovlivňují mezimolekulární síly, není možné vytvořit dostatečně přesný výpočet. Jednou z metod je tedy předpokládat konečnou velikost těchto sil a potom na základě kinetické teorie plynů odvodit odpovídající závislosti viskozity plynu na teplotě. Z toho důvodu, je nutné do materiálového modelu zavést taktéž tzv. Lennard-Jones potenciál, obvykle vyjádřený:

$$V_{LJ} = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] = \varepsilon \left[\left(\frac{r_m}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_m}{r} \right)^6 \right] \quad (5)$$

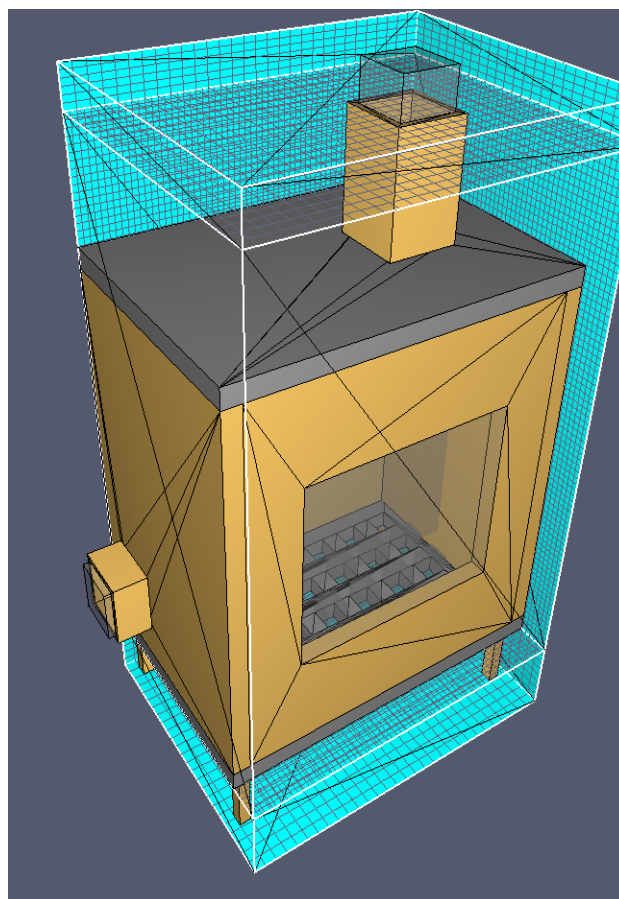
Kde ε je velikost potenciálu, σ je vzdálenost při které je vnitřní potenciál částic roven nule, r je vzdálenost mezi částicemi a r_m je vzdálenost při které je potenciál minimální. Jak je vidět na obr. při r_m , má potenciál hodnotu ε . Přibližná velikost $r_m = 21/6\sigma \approx 1,122\sigma$.

Jako parametry pro řešení modelu, byl tedy použit LE teorém popsany v předchozím textu a neideální energetický přístup, kdy jako produkt spalování vznikají odpadní prvky jako CO, H₂ a saze. Palivo bylo do modelu přiváděno jako drobné částice v množství 5000 /sec s definovaným objemovým tokem (l min⁻¹), rychlostí (m s⁻¹) skrze trysku - kužel 10/12°. V takto poměrně specifických oblastech, jako je atomizace a sprejování částic, nabízí matematika poměrně specifické statistické modely distribučních funkcí velikosti a rozčlenění částic. V tomto případě byly použity částice velikosti

50 μ m dle Rosin-Rammler log normálního rozdělení. Tento statistický model je obecně vhodný pro popis materiálu s velkým množstvím částic, jako například pudry, emulze a plyny. Na druhou stranu vzhledem ke složitosti modelu a ohromné koncentraci částic paliva v relativně malém prostoru pece, nemá dle nalezených výsledků tento parametr zásadní vliv.

EXPERIMENT

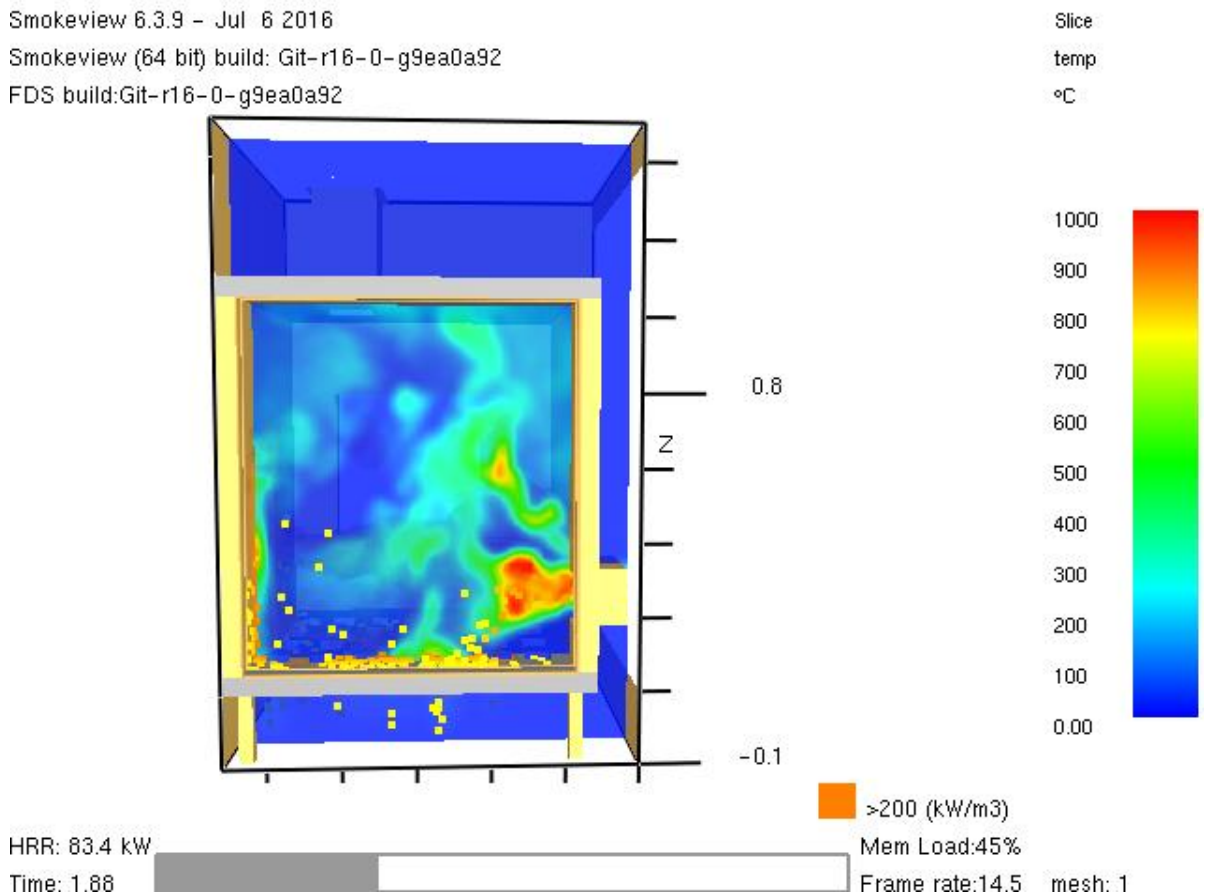
Pro zkoušení materiálových vlastností a ověřování výsledků numerických simulací byla vyrobena malá zkušební pec, která umožňuje zkoušet vzorky o maximálním rozměru 300 x 300 mm. Pro tuto pec byl vytvořen virtuální model v programu Pyrosim, viz obr. 1. Výsledky modelu pak byly následně porovnávány s výsledky měření.



Obr. 1. Model zkušební pece v programu Pyrosim

V prováděných simulacích jsme se snažili co nejlépe přiblížit reálné situaci. Při ověřování modelu byla provedena např. i studie procesu zapálení hořáku (viz obr. 2). Tyto rychlé děje, které se odehrávají v uzavřené peci, bohužel není snadné porovnávat s reálným dějem.

Smokeyview 6.3.9 - Jul 6 2016
Smokeyview (64 bit) build: Git-r16-0-g9ea0a92
FDS build:Git-r16-0-g9ea0a92



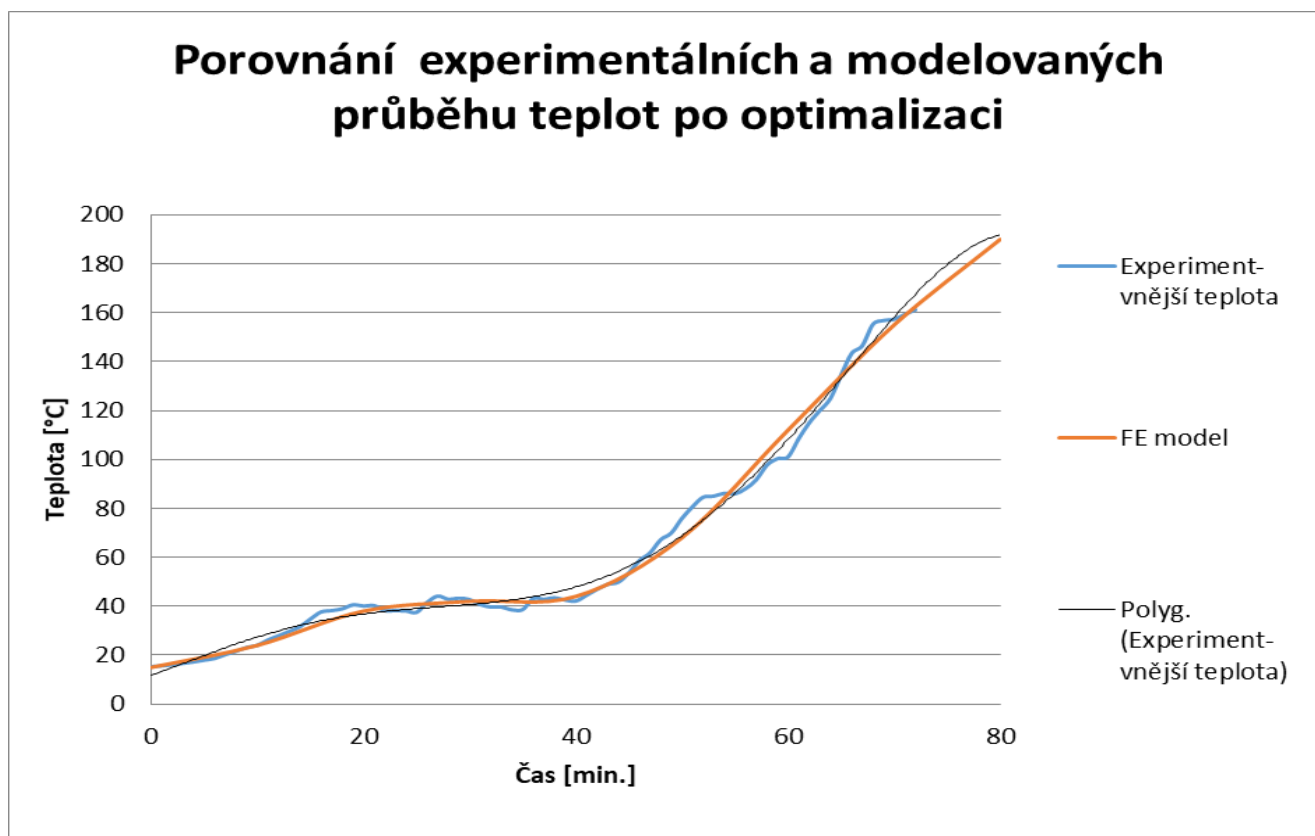
Obr. 2. Simulace zapálení hořáku ve velké peci – nevyhořelé palivo a zážeh

Pro porovnání s realitou bylo proto použito ohřevu po definované teplotní křivce. Zatímco fyzikální nastavení modelu nám zaručí správné vstupní podmínky pro dodržení předepsané teploty, je v reálné peci nutné přímým řízením směsi v daném čase regulovat přívod plynu a tím i průběh teplot uvnitř pece.



Obr. 3. Experiment v malé peci

Malá zkušební pec (viz obr. 3) byla osazena měřícím systémem, který umožňoval měřit jak teploty na vnější straně vzorku, tak i teploty uvnitř pece. Bylo použito termočlánků typu K s různou izolací tak, aby vyhověla požadavkům měření. Na vnější straně vzorku byla použita izolace ze skelných vláken, pro měření teploty vzduchu uvnitř pece byla použita kovová jímka a pro měření na vnitřní straně vzorku (které se v certifikované laboratoři ani neprovádí) bylo použito izolace z keramických trubiček. Pro vyhodnocení teplot bylo použito modelů Adam od firmy Advantech, připojených k PC se speciálně vytvořeným softwarem. Byla provedena celá řada měření, aby bylo možné provést kalibraci modelu. Výrobci použitých materiálů totiž neuvádějí některé materiálové konstanty, které jsou důležité pro správné nastavení modelu. Dále je nutné přihlídnout k tomu, že při ruční regulaci přívodu plynu se sice snažíme dodržovat předepsanou křivku, ale zejména na začátku měření dochází k určitým odchylkám, které se projevují zejména na teplotě uvnitř pece. Na obr. 4 je pak porovnání naměřených teplot na vnější straně vzorku při náběhu teplot podle normované křivky pro materiál, který je kombinací skelného vlákna a sádry.



Obr. 4. Porovnání experimentálních a modelovaných teplot na vnější straně vzorku po optimalizaci

Poděkování

Výzkum prezentovaný v tomto článku byl částečně podpořen projektem Ministerstva vnitra VI20152018046: "Využití moderních metod modelování při vývoji a zkoušení protipožárních uzávěrů".

ZÁVĚR

Výsledky z experimentů a numerických výpočtů se dají prohlásit za relativně v dobré shodě. Mezi hlavní problémy výpočtu patří především jeho výrazná časová náročnost. Je nutné si uvědomit, že v daném případě se nejedná o simulaci např. „pouhé jedné minuty“, ale 1 minuta odpovídá zhruba 50 000 jednotlivých kroků výpočtu. Zde se setkáváme s problémem, kdy zatímco při experimentu regulujeme průtok plynu v reálném čase za účelem dosažení optimálního průběhu teplot, v model se každá podobná změna viditelně projeví až se zpožděním a je nutnost pustit celou simulaci znova. Na rozdíl od experimentu, není tedy možné ovlivňovat okrajové podmínky modelu, real-time v závislosti na vznikajících výsledcích simulace. Jako výrazná úspora času, bez znatelného ovlivnění výsledku modelu je uvážení všech stěn, stropu a dna pece jako zcela inertních. To znamená, že výpočet je zaměřen především na oblast hořáku a vnitřní části

pece, kde je síť nejhustší. A také na přední stěnu komory/pece, kde je upnutý vzorek. Nelze tedy zanedbat vznikající kondukcí a samozřejmě vrstvený vzorek samotný. Do simulace taktéž vstupuje mnoho proměnných od klasických fyzikálních hodnot jako hustota, výhřevnost atd. až po parametry fyziky a chemie částic, jako jsou přitažlivé síly na molekulární úrovni. Vhodnou kombinací všech těchto parametrů, bylo docíleno potřebné přesnosti daného modelu.

LITERATURA

- [1] KUPILÍK V. (2006): *Stavební konstrukce z požárního hlediska*, Grada Publishing
- [2]. EGERT, J. – FRANA, K. – Simon, S. – WICHMANN, S. (2016): *Heat Transfer Studies on Structured Metal Sheets*. KMUTNB: IJAST, 9
- [3] ISO 834-10:2014 *Fire resistance tests - Elements of building construction*, (2014)
- [4] KULHAVÝ, P. – KLEČKOVÁ, J. – PETRŮ, M. – HAVLÍČEK, M (2016): *Optimization of the heat output*, EPJ Web of Conferences, 114, 02061
- [5] WEBB, R. L. – KIM, N. (2005): *Principles of enhanced heat transfer*, Taylor & Francis.
- [6] LENNARD-JONES, J. E. (1924) *On the Determination of Molecular Fields*, Proc. R. Soc. Lond. A, 106

- [7] GIESEN, B. J. M. et. al. (2011): *Modelling and simulation of a jet fan*, Env. Modelling and Software, 26
- [8] PIOMELLI, U. (2001): *LE and direct simulation of turbulent flows*, University of Maryland, USA
- [9] PIOMELLI, U. (1999): *Large-eddy simulation: achievements and challenges*, Progress in Aerospace Sciences, 35
- [10] McGRATTAN et al.(2016): *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*, 6
- [11] FRENKEL, D. – SMIT, B. (2002) *Understanding Molecular Simulation*, San Diego: Academic Press, 2
- [12] SIS, H. – KELBAIYEV, G. – CHANDLER, S. (2005): *Kinetics of drop breakage under turbulent conditions*, Sci. Technol., 26
- [13] JURADO, E. et al (2007): *Estimation of the distribution of droplet size*, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 295
- [14] ÚNMZ (2000): *ČSN EN 1363-1 - Testing of fire resistance - Part 1*, Praha
- [15] KÓL, P. (2011) *Combustion dynamics, Combustion proceses*, available at: <http://Spalovaciprocesy.wz.cz/Statikahoreni.html>,
- [16] FDSDSMV Official Website: *Fire Dynamics Simulator*, USA, National Ins. of Standards and Technology.
- [17] AKSELVOLL, K. – MOIN, P. (1996): *Large-eddy simulation of turbulent coned coannular jets.*, J. Fluid Mech.
- [18] LEFEBVRE, A. H. (1989) *Atomization and Spray*, Hemisphere Publishing, Washington