MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ POŽÁRNÍ ZKOUŠKY V RODINNÉM DOMKU V BOHUMÍNĚ POMOCÍ SW FLUENT

MATHEMATICAL MODELLING OF FIRE EXPERIMENT IN FAMILY HOUSE IN BOHUMIN USING FLUENT SOFTWARE

Milada KOZUBKOVÁ, Marian BOJKO, Otto DVOŘÁK, Jaroslav KRUTIL
milada.kozubkova@vsb.cz, marian.bojko@vsb.cz, odvorak@mvcr.cz,
jaroslav.krutil@vsb.cz

Došlo 5. 4. 2011, přijato 9. 11. 2011.
Dostupné na http://www.population-protection.eu/
attachments/039_vol3n2_kozubkova_bojko_dvorak_krutil.pdf.

Abstract

The issue of CFD simulation of burning and spread of fires in enclosed buildings is a very complex process which requires both a basic knowledge of the physical flow with burning, but also detailed information about the object, its boundary conditions and thermophysical properties of the materials. Thermophysical properties of some materials have a significant impact on the actual spread of fire and heat transfer by combustion. Proper determinations of these properties have a large influence on the results of numerical simulation. These characteristics were obtained either from tables or from the results of the experiment. The calculated results were compared with those obtained by experiment.

The aim is therefore the validation of mathematical model using computer software FLUENT for fire technical expertise and thereby to contribute to better understanding of fire behavior in the living room, to prevent its possible spread to other areas of the house and thus avoid unnecessary losses of tangible property and especially to human lives.

Keywords
CFD, combustion, fire, burning, numerical simulation, FLUENT, heat transfer.

ÚVOD

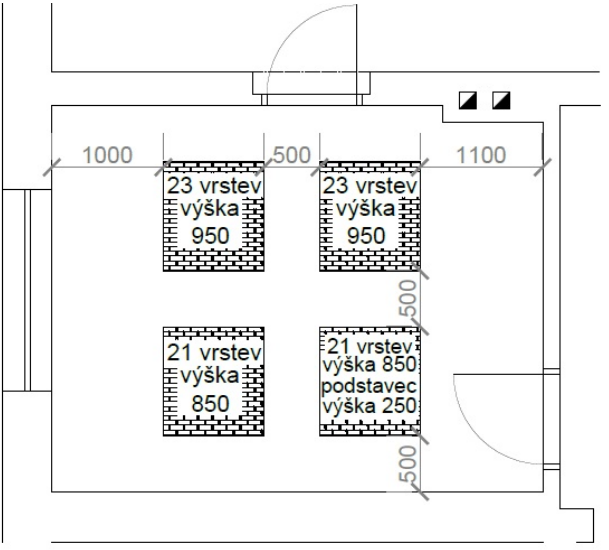
Článek se zabývá šířením požáru v rodinném domku, vytvořením matematického modelu a následnou numerickou simulací v programu FLUENT. Tento matematický model má co nejlépe vystihnout velkorozměrnou požární zkoušku, která byla provedena dne 19. 11. 2009 ve vybraném rodinném domě v Bohumíně.[6] Scénář zkoušky byl následující. Záměrně založený požár v jídelně třípodlažního domu se následně rozšířil do velké oblasti prvního patra. Po dostatečném rozšíření byl požár zlikvidován. Cílem práce je vývoj a validace požárních matematických modelů pro stanovení vývinu/šíření tepla a kouře,

toxických plynů, tlakových vln pro simulaci/interpretaci scénářů požárů a jejich ničivých účinků pomocí SW FLUENT.

Samotné matematické modelování spočívá v řešení hoření, přestupu tepla přes stěny modelu a proudění vzduchu v řešené oblasti.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST S OKRAJOVÝMI PODMÍNKAMI

Cílem požární zkoušky bylo co nejvěrohodněji napodobit skutečné šíření požáru s využitím požárního zatížení a to jak do druhů hořlavých materiálů, tak i jejich umístění v prostoru a celkového množství. Umístění požárního zatížení v jídelně je patrné z obr. 1. [6]



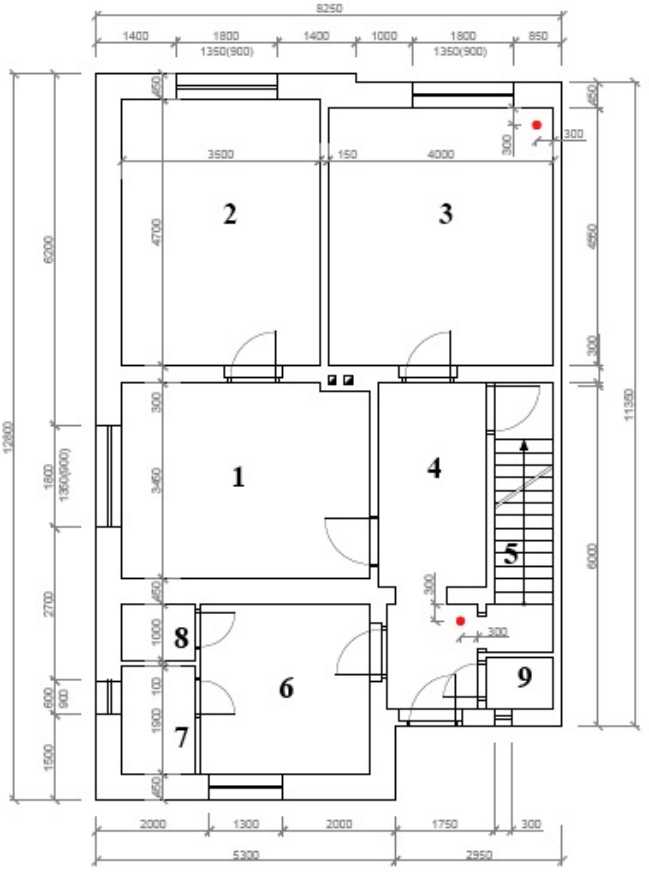
Obr. 1
Schéma rozmístění hraniček dřeva v jídelně

Toto zatížení je při požární zkoušce zajištěno pomocí hraniček dřeva, skládající se z hranolků o rozměrech $4x4x100\,cm$. Celková hmotnost dřeva je $730{,}2\,kg$ a má výhřevnost $16{,}75\,MJ.kg^{-1}$. Dále je pak nutno zahrnout do požárního zatížení také akceleranty vznícení. Těmito akceleranty jsou toluen o množství $2\,l$ a výhřevnosti $41\,MJ.kg^{-1}$ ve $2\,ks$ skleněných lahvích o objemu $1\,l$ a heptan o výhřevnosti $45\,MJ.kg^{-1}$ v plechovém tácu pod jednou hraničkou dřeva o objemu $14{,}5\,l$.

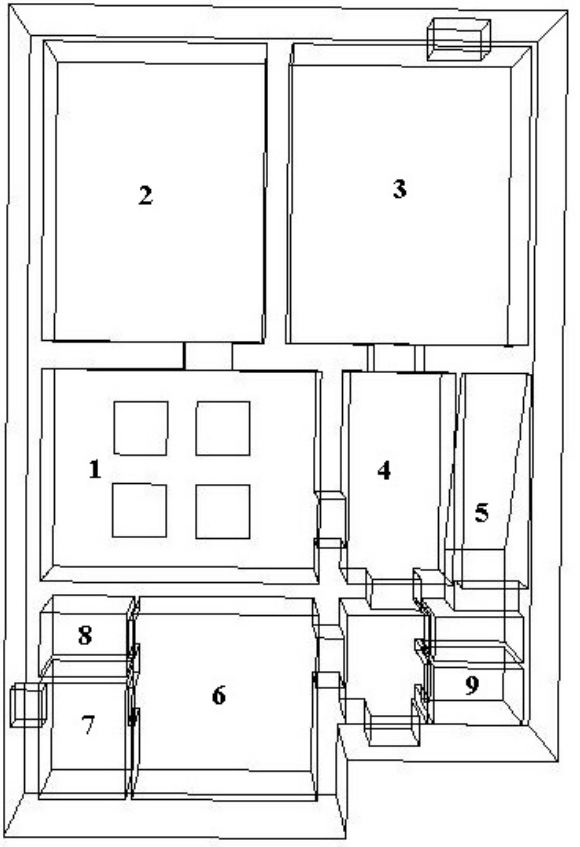
Po provedení zkoušky bylo zjištěno, že z požárního zatížení tvořeného dřevěnými hranolky zbylo v přepočtu 374 *ks* hranolků o hmotnosti přibližně 305 *kg* . [6] Další nezbytné fyzikální informace o materiálech využitých na požární zatížení jsou vyznačeny v tab. 1.

Tabulka 1
Fyzikální parametry materiálů využitých k požárnímu zatížení

Parametr	**Dřevo**	**Heptan**	**Toluen**
ρ [kg.m^{-3}]	515,5	680	867
$Q_{vyhř}$ [MJ.kg^{-1}]	16,75	45	41



Obr. 2
Výkres půdorysu 1. NP



Obr. 3
Model 1.NP rodinného domu

Vysvětlivky: 1 - jídelna, 2 - ložnice, 3 - obývací pokoj, 4 - chodba, 5 - schodiště do 2. NP, 6 - kuchyně, 7 - lázeň, 8 - spíž, 9 - WC

Další nezbytnou informací pro úspěšnou matematickou simulaci je výkresová dokumentace daného objektu. Jelikož požár zasáhl pouze druhé podlaží, matematický model byl soustředěn právě na tuto oblast. Na obr. 2 [6] je podrobně vyobrazena výkresová dokumentace tohoto podlaží. Pro lepší vizualizaci je na obr. 3 zobrazen prostorový model oblasti.

Popis stavu oken a dveří při experimentu, které jsou dalším velice důležitým aspektem pro následné úspěšné řešení. Stav těchto okrajových podmínek je detailně popsán v tab. 2. [6]

Tabulka 2
Popis stavu oken a dveří v objektu 1 podlaží při experimentu

	Otvor	Místnost	Rozměr (š x v) [mm]	Stav	Poznámka
1 NP	O	1	2x (500 x 1280)	Zasklené	Dvojité okno, dvoukřídlé
	D	1/2	800 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	D	1/4	800 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	O	2	2x (500 x 1250)	Zasklené	Dvojité okno, dvoukřídlé
	D	3/4	800 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	O	3	2x (400 x 1080)	1/2 Zasklené	Jedno křídlo bez skla
	D	4/6	800 x 1970	Zavřené	Dřevěné dveře
	D	4/ven	800 x 1970	Zavřené	Ocelové
	D	4/5	800 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	D	6/7	600 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	D	6/8	600 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	O	7	800 x 900	Zavřené	Uzavřené dřevěnou deskou
	O	6	1200 x 1200	Zavřené	Zazděné
	D	4/9	600 x 1970	Otevřené	Bez dveřního křídla
	D	4/1PP	800 x 1970	Zavřené	Dřevěné dveře

Vysvětlivky: O - okno, D - dveře

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

1 Matematický model:

1.1 Matematický model požáru se zdrojem tepelného výkonu

Daná úloha se řeší s ohledem na proudění s hořením v daném objektu jako turbulentní. Matematický model se skládá z rovnic kontinuity, Navierovy - Stokesovy rovnice, rovnice energie a rovnice pro šíření příměsí. Při řadě

praktických výpočtů turbulentního proudění se využívá časově středovaných veličin, jež jsou v následných odstavcích a rovnicích označeny pruhem nad danou fyzikální veličinou. Je to způsobeno faktem, že při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla nelze s ohledem na nutný počet buněk sítě a možnosti výpočetní techniky použít metodu přímou (DNS). Také metoda velkých vírů (LES) je při takto složité geometrii časově náročná.

1.1.1 Rovnice kontinuity pro proudění stlačitelné tekutiny

Rovnice vyjadřující zákon zachování hmotnosti se nazývá „rovnicí kontinuity“. Pro neustálené, tedy časově závislé, proudění stlačitelných tekutin ji lze v diferenciálním tvaru vyjádřit takto [3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \overline{u}_j\right)}{\partial x_j} = S_m \quad , \tag{1}$$

kde $\overline{u}_i$ je „časově středovaná složka rychlosti“ proudění $(m \cdot s^{-1})$, x_j je souřadnice (m), ρ je hustota $(kg \cdot m^{-3})$ a S_m je objemový zdroj $(kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$.

1.1.2 Pohybové rovnice pro proudění stlačitelné tekutiny

Rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti se nazývají „Navierovy - Stokesovy rovnice“. Po dosazení časově středovaných veličin do Navierových - Stokesových rovnic nabývají tyto rovnice tvaru tzv. „Reynoldsových rovnic“. Rovnice pro přenos hybnosti u stlačitelných tekutin mají tedy tvar [3]:

$$\frac{\partial \left(\rho \overline{u}_i\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_t \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) + \rho \delta_{i3} g \,, \tag{2}$$

což odpovídá diferenciálnímu tvaru „rovnice pro přenos hybnosti“, kde $\overline{p}$ je tlak (Pa), μ_t je turbulentní viskozita $(m^2 \cdot s^{-1})$, δ_{i3} je Kroneckerovo delta $(-)$, $g = -9{,}81\ (m.s^{-2})$ je „gravitační zrychlení“ v případě účasti vztlakových sil.

1.1.3 Rovnice pro turbulentní veličiny

Rovnicemi pro vyjádření turbulentních veličin jsou myšleny rovnice pro „turbulentní kinetickou energii“ k a „rychlost disipace“ ε. Exaktní rovnici pro k lze odvodit z Navierových - Stokesových rovnic a má tvar [3]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j} k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + v_t\left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_l} + \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j}\right)\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \quad , \tag{3}$$

kde v_t je turbulentní viskozita $(m^2 \cdot s^{-1})$, σ_k je empirická konstanta $(-)$, C_D je konstanta $(-)$.

„Turbulentní kinetická energie“ k $(m^2 \cdot s^{-2})$ uvedená v rovnici (3) je definována jako [3]:

$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}\right) = \frac{1}{2}\overline{u_j'^2} \tag{4}$$

Exaktní rovnici pro ε $(m^2 \cdot s^{-3})$ lze opět odvodit z Navierových - Stokesových rovnic a má tvar [3]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \overline{u}_l}{\partial x_j}\right)\frac{\partial \overline{u}_l}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

Vztah pro „turbulentní viskozitu“ ν_t je pak definován takto [3]:

$$\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

1.1.4 Rovnice energie

Rovnice energie vyjadřuje „zákon zachování energie“, podle kterého je „celková změna energie“ $\overline{E}$ tekutiny v určitém „objemu“ V dána změnou „vnitřní energie“ a „kinetické energie“ a tokem obou energií „plochou“ S omezující objem V. Výsledná rovnice má tvar [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho \overline{E}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho \overline{u}_j \overline{E}\right] = -\frac{\partial\left(p\overline{u}_j\right)}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{q}_j}{\partial x_j} + S_h \ , \tag{7}$$

kde je S_h zdrojový člen ($\mathrm{J.s^{-1}.m^{-3}} = \mathrm{W.m^{-3}}$).

1.1.5 Transportní rovnice pro přenos příměsí

FLUENT počítá v modelu „časově středované hodnoty lokálních hmotnostních zlomků příměsí“ $\overline{Y}_{i'}$, kde i' je index vyjadřující počet příměsí, které jsou popsány podobnou bilanční rovnicí, jako je tomu u rovnice energie (7) zahrnující řešení konvektivní a difúzní složky přenosu. Index vyjadřuje počet příměsí. Je využíváno vztahu, který má v konzervativní formě tvar [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \overline{Y}_{i'}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\rho \overline{u}_j \overline{Y}_{i'}\right) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{j,i'} + R_{i'} + S_{i'} \quad , \tag{8}$$

kde $\overline{u}_i$ je „časově středovaná složka rychlosti“ proudění $(m \cdot s^{-1})$ a na pravé straně je $R_{i'}$ „rychlost produkce příměsí i'“ vlivem chemické reakce a $S_{i'}$ „rychlost tvorby přírůstku z distribuované příměsi“. Distribuce příměsí může být realizována

za různých podmínek. Při turbulentním proudění FLUENT pro vyjádření difúzního toku i' -té složky uplatňuje vztah [3]:

$$J_{i'} = -\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial \overline{Y}_{i'}}{\partial x_j} \quad , \tag{9}$$

kde Sc_t je „Schmidtovo turbulentní číslo“ (–) (přednastaveno na hodnotu 0,7).

1.2 Matematický model zdroje energie a spalin

Řešení 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 .

Protože zdrojové členy jsou definovány na jednotku objemu, je nutné nejprve určit velikost objemu zdroje pomocí integrace (Report-Volume Integral).

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

$$S_m = \frac{Q_m}{V} \qquad [\mathrm{kg.m^{-3}s^{-1}}] \tag{10}$$

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

$$S_h = \frac{E}{t \cdot V} \qquad [\mathrm{J.s^{-1}.m^{-3}=W.\ m^{-3}}] \tag{11}$$

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

Turbulentní kinetická energie S_k a rychlost disipace S_ε nebyla definována, z toho důvodu nebyla uvažována.

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.

$$
\begin{aligned}
CO_2\ mass\ fraction\ source &= \frac{Q_{mCO2}}{V} \qquad [\mathrm{kg.s^{-1}m^{-3}}] \\
CO\ mass\ fraction\ source &= \frac{Q_{mCO}}{V} \\
O_2\ mass\ fraction\ source &= \frac{Q_{mO2}}{V} \\
H_2O\ mass\ fraction\ source &= \frac{Q_{mH2O}}{V}
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

kde $CO_2, CO, O_2, H_2O, mass\ fraction\ source$ je koncentrace vyjádřená hmotnostním zlomkem.

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.

Základními stavebními prvky paliva (dřevo) jsou uhlík, kyslík a vodík, které činí zhruba $95-98\,\%$ suché hmoty a které se spojují do polymerních látek. Toto poznání vedlo k zavedení obecného chemického vzorce dřeva ve tvaru $C_{100}H_{144}O_{66}$ [10]. Chemické složení dřeva je udáváno následovně: lignin $(20-30\,\%\ hm.)$, hemicelulóza $(20-30\,\%\ hm.)$, organické látky $(1-3\,\%\ hm.)$ a anorganické látky $(0{,}1-0{,}5\,\%\ hm.)$. Rovnice při dokonalém spalování je následující:

$$C_{100}H_{144}O_{66} + 103\,O_2 = 100\,CO_2 + 72\,H_2O \qquad (13)$$

V případě nedokonalého spalování jsou koeficienty závislé na stupni oxidace a vývinu CO_2 a CO. Tedy:

$$a\,C_{100}H_{144}O_{66} + b\,O_2 = c\,CO_2 + d\,CO + e\,H_2O \qquad (14)$$

Přitom koeficienty musí být zvoleny tak, aby platila stechiometrická rovnice, tedy:

$$
\begin{aligned}
a*100 &= c + d \\
a*144 &= e*2 \\
a*66 + b*2 &= c*2 + d + e
\end{aligned}
\qquad (15)
$$

2 Fyzikální vlastnosti

V celé oblasti matematického modelu jsou uvažovány dvě základní hmoty. Jsou to, proudící medium (tekutina) a stěny (pevná hmota). Jako proudící medium je uvažován vzduch jako směs kyslíku a dusíku definovaná parametry, které jsou naznačeny v tab. 3. [5]

U hustoty směsi byl nastaven parametr ideální plyn. To znamená, že hustota plynové směsi je počítána podle stavové rovnice plynů.

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad , \tag{16}$$

kde ρ je hustota směsi $(kg \cdot m^{-3})$, T je teplota (K), p je tlak (Pa), R je plynová konstanta $(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$ a M je molární hmotnost $(g \cdot mol^{-1})$.

Nastavení mixing-law u příslušných parametrů naznačuje, že se tyto parametry počítají na základě směšovacích zákonů.

FLUENT umožňuje využít k řešení radiace mnoho modelů. V našem případě byl využit model DO (Discrete ordinate model). Představuje nejkomplexnější ze všech radiačních modelů, který ve své podstatě nemá omezení použitelnosti, pokud jde o součinnost s jiným nastavením matematického modelu.

Při řešení, které využívá radiační model DO, nám umožňuje FLUENT nastavit koeficient absorpce u plynné směsi pomocí tzv. weighted-sum-of-gray-gases (WSGGM) – cell-based modelu, který využívá k výpočtu koeficientu absorpce optickou délku a ta závisí na charakteristické velikosti buňky sítě [3]. Z toho vyplývá, že je výrazně ovlivňována kvalitou sítě matematického modelu. Výhodou tohoto modelu je, že není potřeba definovat další vstupy a parametry.

Tabulka 3
Fyzikální parametry zadávané do programu FLUENT pro proudící směs

Složení směsi (vzduchu) na vstupu	**Jednotky**	**Objemový zlomek**	
dusík	-	0,79	
kyslík	-	0,21	
Suma		1	
Hustota směsi (ρ)	$kg.m^{-3}$	Ideal-gas	Ideální plyn
Měrná tepelná kapacita (Cp)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	Mixing-law	Směšovací zákon
Součinitel tepelné vodivosti (λ)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Ideal-gas-mixing-law	Ideální plyn - směšovací zákon
Dynamická viskozita (η)	$kg.m^{-1}.s^{-1}$	Ideal-gas-mixing-law	Ideální plyn - směšovací zákon
Difúzní součinitel (D)	$m^2.s^{-1}$	$2{,}88e^{-5}$	
Absorpční koeficient (σ_A)	m^{-1}	Wsggm-cell-based	Model na bázi buněk s váženou sumou šedých plynů
Součinitel zeslabení (σ_S)	m^{-1}	0	
Rozptyl fázové funkce	-	Isotropic	Izotropní
Index lomu (I)	-	1	

Požární cihla je druhým materiálem, který je v modelu použit. Tento materiál je nastaven pro všechny pevné a nepohyblivé části v domě (strop, podlaha a jednotlivé stěny uvnitř domu). Fyzikální parametry jsou detailně popsány v tab. 4. [9]

Tabulka 4
Fyzikální parametry požární cihly

Hustota (ρ)	$kg.m^{-3}_N$	750	
Měrná tepelná kapacita (Cp)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	1040	
Součinitel tepelné vodivosti (λ)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Piecewise-linear	Po částech lineární
Absorpční koeficient (σ_A)	m^{-1}	50000	
Součinitel zeslabení (σ_S)	m^{-1}	0	
Rozptyl fázové funkce	-	Isotropic	Izotropní
Index lomu (I)	-	1	
Emisivita (ε_T)	-	0,8	

Z tab. 4 je patrné že všechny stěny, strop a podlaha jsou definovány pomocí Piecewise-linear funkce, která umožňuje definovat tepelnou vodivost v závislosti na měnící se teplotě formou tabulky popisující tepelnou vodivost za užití čtyř bodů, což je dostačující. Číselné hodnoty při určitých bodech teploty jsou naznačeny v tab. 5. [9]

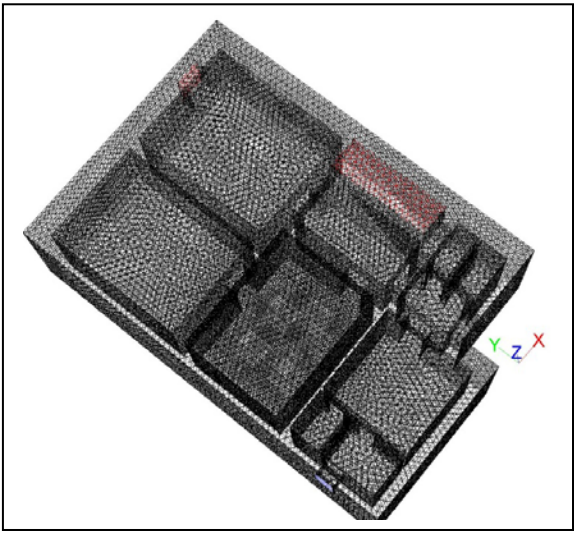
Tabulka 5
Funkce popisující závislost tepelné vodivosti na teplotě

Parametr	**1**	**2**	**3**	**4**
Teplota [°C]	0	200	300	600
Součinitel tepelné vodivosti [λ]	0,36	0,36	0,38	0,455

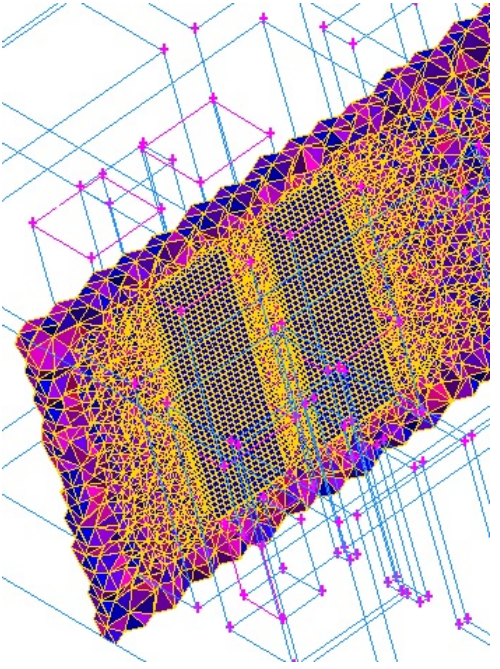
3 Výpočetní síť

Geometrie a výpočetní síť kompletně vychází z přiložené výkresové dokumentace. Výpočetní síť domu byla vytvořena v programu GAMBIT 2.4.6 s celkovým počtem buněk 309977. Jedná se o nestrukturovanou síť vytvořenou pomocí prvků mnohostěnu různorodých tvarů. Oblast s předpokládaným zdrojem tepla je vysířovaná velice podrobně a jemně. To je provedeno z důvodu významného ovlivnění proudění a s tím i související rozložení teplot ve

zkoumaném poli. Geometrie matematického modelu domku a jeho detail v místě zhuštění sítě je zobrazen na obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4
Výpočetní síť domku



Obr. 5
Detail zhuštění sítě

4 Okrajové podmínky

Veškeré okrajové podmínky byly z velké části převzaty z dostupných podkladů o experimentu. Obě hlavní okrajové podmínky jak tlaková, tak i teplotní, které byly definovány v naší úloze, byly získány z dostupných informací o povětrnostních podmínkách při průběhu měření. Okrajová podmínka na vstupu byla nadefinována jako tlaková podmínka (pressure-inlet). Okrajové podmínky pro oba výstupy byly obě definovány jako tlakový výstup (pressure-outlet). Teplotní podmínka na vstupu i výstupech nabývala hodnoty $T = 10\,°C$. Proudícím médiem celé oblasti je vzduch definován jako složení $N_2 = 79\,\%\,obj.$ a $O_2 = 21\,\%\,obj.$

Další důležitou okrajovou podmínkou, která významně ovlivňuje výsledky matematické simulace, je definice vlastností vnitřní stěny, stropu a podlahy domu. Tyto plochy byly definovány jako spojené (coupled), tj. dovolují modelovat přestup tepla.

Vzhledem k podrobnějším a komplexnějším výsledkům byla do matematické modelace zahrnuta radiace. Záření (radiace) představuje přenos elektromagnetické energie ve formě vln s příčným kmitáním vzhledem ke směru jejich šíření prostorem. K řešení radiace byl využit tzv. DO radiační model (Discrete ordinate model) [3]. Po zvolení radiačního modelu DO v panelu materiálových charakteristik se zadávají následující veličiny o těchto parametrech:

- Koeficient absorpce (Absorption coefficient) $\sigma_A = 50000\ m^{-1}$
- Součinitel zeslabení (Scattering coefficient) $\sigma_S = 0\ m^{-1}$
- Index lomu (Refractive index) $I = 1$

V těchto podmínkách však funguje stěna pouze jako těleso, které radiaci přijímá z vnějšího zdroje (a podle toho se úměrně zahřívá), ale sama radiaci negeneruje (stěna sama nevyzařuje teplo formou radiace).

Pro správně fungující model radiace je nezbytné nadefinovat ještě u okrajových podmínek vnitřní stěny její emisivitu a ta nabývá hodnoty $0{,}8$. [6]

Poslední okrajová podmínka definovaná na tomto matematickém modelu náleží vnějším stěnám domu. Na těchto stěnách byla nastavena konstantní teplota okolí získaná měřením povětrnostních podmínek. Tato teplota je rovna hodnotě $T = 10\,°C$. Emisivita vnější stěny je opět rovna hodnotě $0{,}8$. [6]

5 Definice zdroje

Z detailu geometrie sítě obr. 3 je patrné, že umístění a požární zatížení ve formě hraniček z trámků v jídelně je totožné jako u experimentu. Tyto hraničky budou v matematickém modelu definovány jako objemový zdroj tepelného výkonu. Iniciace požáru byla zajištěna hořlavinami toluen a heptan, které byly také zahrnuty do celkového výkonu tepelného zdroje. Výpočet celkového výkonu tepelného zdroje, který je ve výpočtu definován objemem všech čtyř hranic, je naznačen v tab. 6.

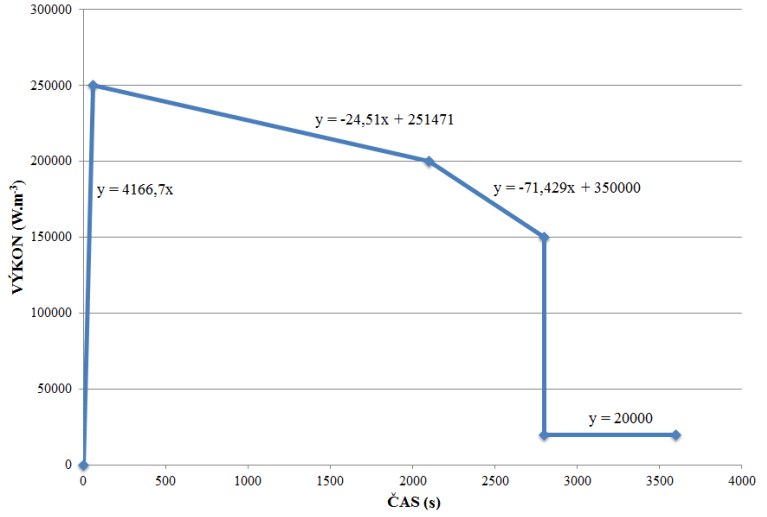
Tabulka 6
Výpočet celkového výkonu tepelného zdroje

Parametr	**Dřevo**	**Heptan**	**Toluen**
Hmotnost [kg]	425	10,54	1,734
Výhřevnost [MJ.kg^{-1}]	16,75	45	41
Hustota [kg.m^{-3}]	515,5	680	876
Celkový výkon tepelného zdroje vztažen k objemu 1 m^3 [W.m^{-3}]			167851,11

Při výpočtu celkového výkonu se vytvořil objem hranice sestávající ze dřeva, akcelerantů a vzduchu v modelované oblasti. Jelikož tepelný výkon vzduchu je nulový a výkon dřeva a akcelerantů je roven hodnotě $P_c = 1632358{,}9\, W \cdot m^3$, musí být pak tento výkon přepočten na objem hranice.

K dosažení požadované křivky teploty v měřeném časovém úseku dle experimentu byla v simulaci využita uživatelská funkce UDF v jazyku C++. Časový úsek byl roven hodnotě $t = 3600\, s$.

Křivka průběhu v měřeném časovém úseku byla odhadnuta z výsledků teplot získaných z experimentu. Při zadání časově závislého výkonu 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, přitom střední hodnota výkonu je shodná s konstantní hodnotou výkonu. Pro tuto funkční závislost bylo stanoveno šest základních bodů, jejichž rozložení je patrnější z obr. 6, který je vyobrazen níže.



Obr. 6
Definice celkového výkonu zadávána v závislosti na čase

Popis těchto bodů je detailně rozepsán tabulce 7. Zde jsou i číselné hodnoty, které jim náleží v daném čase.

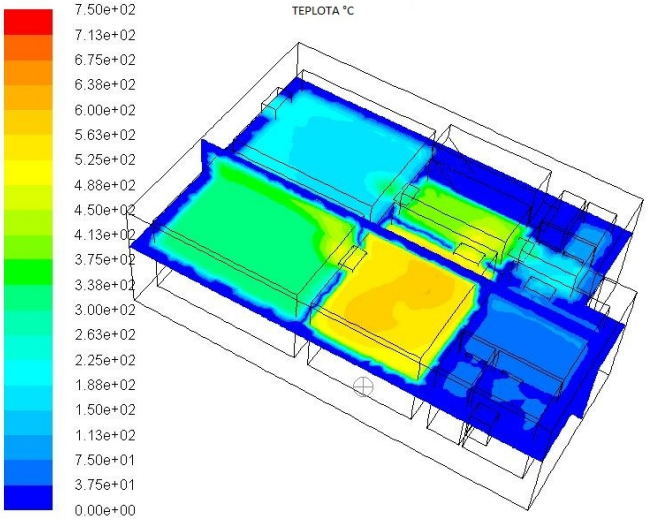
Tabulka 7
Číselné hodnoty pro zadané body

Čas [s]	0	60	2100	2800	2800	3600
Výkon [W.m^{-3}]	0	250000	200000	150000	20000	20000

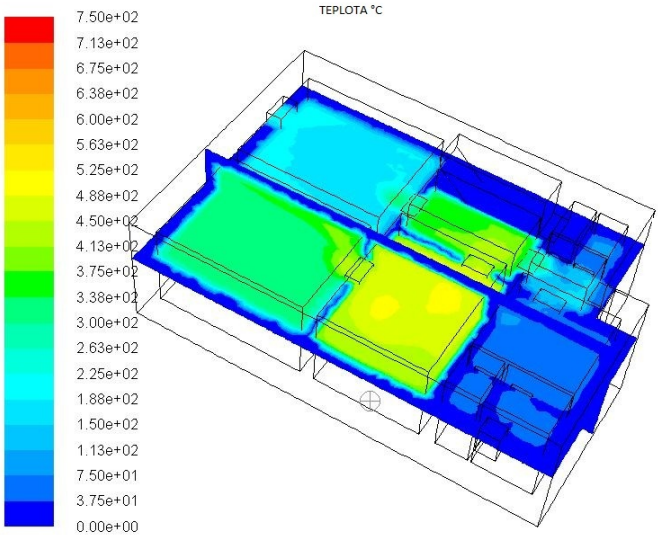
Při zadání této křivky (viz. obr. 6) do UDF funkce byla využita parametrizace úseček. Tato parametrizace spočívá v rozdělení křivky celkového výkonu na samostatné celky (úsečky). U každé z těchto úseček se pomocí rovnice regrese získala jejich parametrická rovnice. Tímto způsobem bylo dosaženo velmi přesného popisu křivky pro celkový výkon. Výhodou funkce UDF je, že umožňuje zadání prakticky libovolného tvaru energetické křivky.

6 Výsledky

Předmětem zájmu bylo sledování změn rychlostního a zejména pak teplotního pole. Z toho se vycházelo při vyhodnocení výsledků řešení. Následující obrázky (viz. obr. 7 a 8) ilustrují formou vyplněných kontur výsledky výpočtu teplotního pole. Znázornění tohoto pole je pro lepší viditelnost provedeno pomocí vhodně umístěných řezů přes modelovanou oblast. Pro srovnání a názornější ilustraci jsou všechny grafické obrázky doplněny barevným měřítkem.



Obr. 7
Kontury teplotního pole v čase t = 200 s



Obr. 8
Kontury teplotního pole v čase t = 2400 s

V závěrečné části vyhodnocení výsledků byly porovnávány teploty experimentu s modelem v místech umístění termočlánků. Umístění termočlánků v experimentu se shoduje s umístěním v numerickém modelu. Pro lepší orientaci ve výsledcích je označení termočlánků v matematickém modelu totožné jako u experimentu. Z důvodu náročnějšího výpočtu jak na čas, tak i na počítačovou techniku.

Jelikož výpočet klade neúměrné nároky na rozsah a čas výpočtu, byly k porovnání výsledků vybrány pouze některé termočlánky v jídelně a ložnici. Další důvod výběru pouze některých termočlánků spočívá v nepřehlednosti následného vyhodnocení výsledků všech termočlánků.

K porovnání byly vybrány tyto tři termočlánky:

- T4B, T12B (jídelna),
- T12 (ložnice).

Ve vybraných bodech oblasti odpovídajících umístění termočlánků byl proveden záznam teploty a vykreslen graficky v závislosti na čase. Pro porovnání jsou použity grafy z měření.

Na obr. 9. [6] je záznam teplot termočlánky při experimentu ve všech měřených bodech v jídelně a na obr. 10 je časová závislost teploty odpovídající termočlánkům T12B a T4B.

Na obr. 11 [6] je opět záznam teplot měřených všemi termočlánky umístěnými v ložnici a porovnání s numerickým experimentem je na obr. 12, kde záznam teplot na čase byl proveden v místě odpovídajícím termočlánku T12.

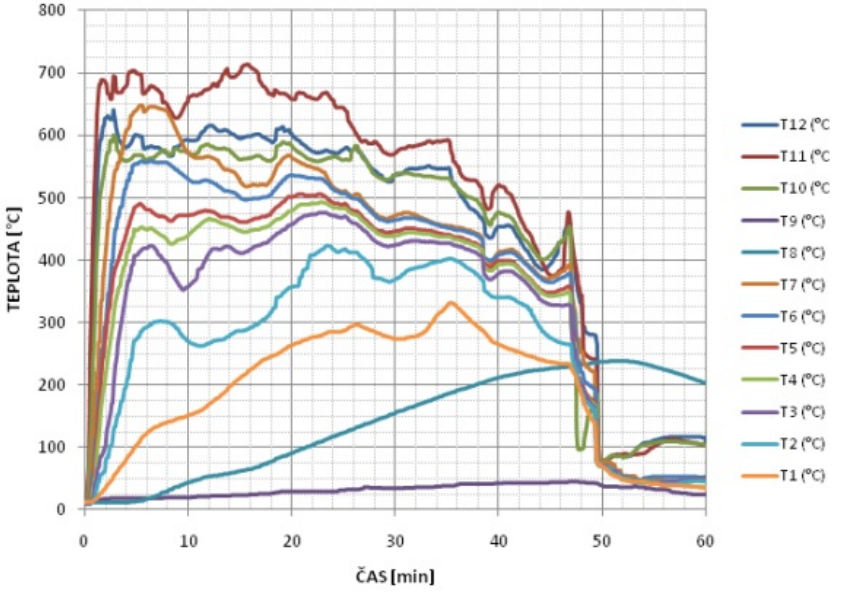
Jak je na první pohled patrné, výsledné teploty u všech porovnávaných termočlánků v matematické simulacei a požární zkoušky se od sebe liší jen velmi

nepatrně. Maximální teploty, kterých dosahují zkoumané termočlánky s označením T4B a T12B při experimentu, jsou rovny přibližně hodnotám $T_{4B} = 500\,°C$ a $T_{12B} = 615\,°C$. U matematického modelu teploty ve stejných termočláncích nabývají hodnot $T_{4B} = 520\,°C$ a $T_{12B} = 585\,°C$. Teplota u zkoumaného termočlánku umístěného v ložnici (termočlánek T12) nabývá při požární zkoušce maximálních hodnot $T_{12} = 325\,°C$. V provedené simulaci se blíží teplota tohoto termočlánku hodnotě $T_{12} = 380\,°C$.

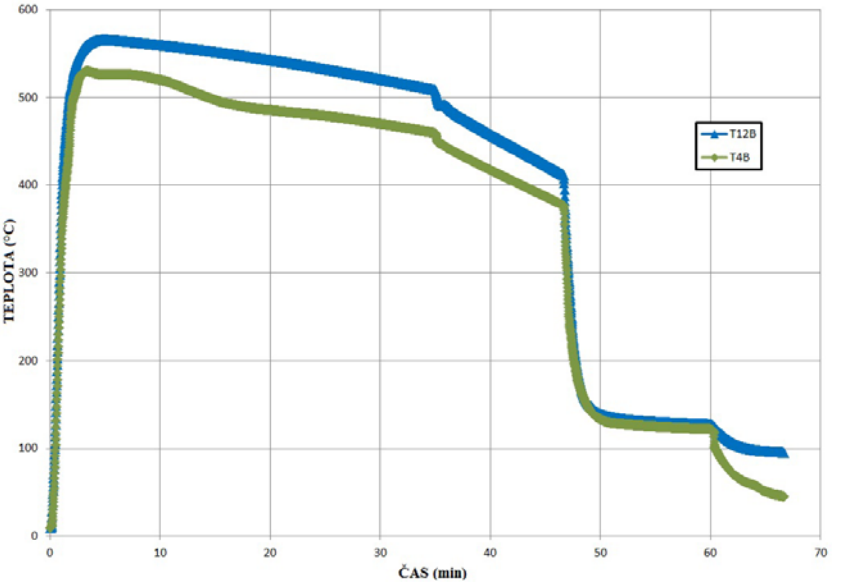
Z obou srovnání plyne, že numerický výpočet této úlohy při využití časově závislého zdroje energie mírně nadhodnocuje teplotu ve zkoumané oblasti ve srovnání s experimentem.

Bylo také dosaženo velmi dobré shody změny teploty v časovém průběhu. Kdy numerická simulace popisuje velmi přesně chování požáru během experimentu. A téměř dokonale kopíruje jeho průběh. Tedy: vznícení, hoření, prudké ochlazení vlivem úbytku spalovaného materiálu a následné dohořívání.

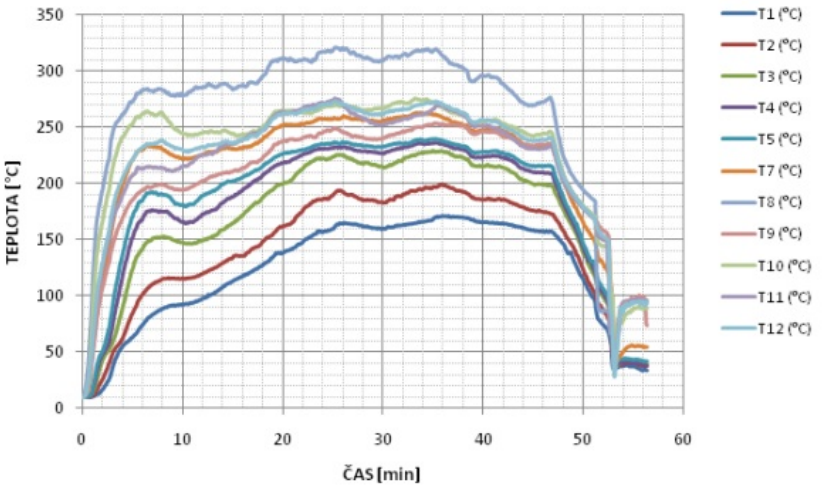
Výpočet teplot byl realizován modelem dokonalého spalování. Generace spalin je definována na základě experimentu, tj. v závislosti hmotnostních zlomků na tepelném výkonu.



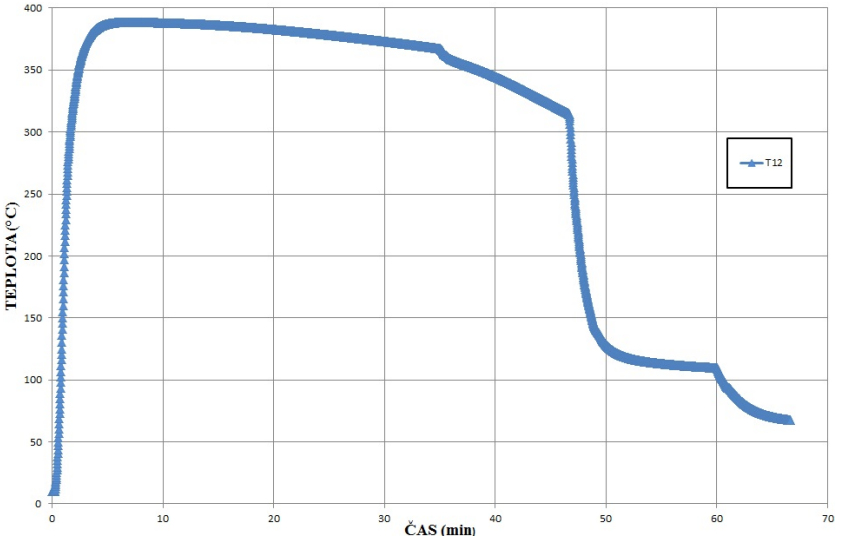
Obr. 9
Záznam průběhu teplot v jídelně získané z experimentu



Obr. 10
Záznam průběhů teplot vybraných termočlánků v jídelně získané z numerické simulace



Obr. 11
Záznam průběhu teplot v ložnici získané z experimentu



Obr. 12
Záznam průběhu teploty u vybraného termočlánku v ložnici získané z numerické simulace

ZÁVĚR

V práci je popsána simulace šířením požáru v prvním patře v rodinném domku. Matematický model domku je věrnou kopií skutečného domku. Model má také totožné okrajové podmínky jako experiment včetně meteorologických dat. V první části článku byla popsána velkorozměrová požární zkouška, základní problematika a veškeré potřebné informace k pochopení celé podstaty úlohy. Dále následuje numerické řešení úlohy. Tato část zahrnuje matematický model požáru s využitím zdroje tepelného výkonu. Zde jsou popsány základní rovnice, které jsou využity k řešení problematiky. Následně článek obsahuje popis fyzikálních parametrů, geometrie se sítě, okrajové podmínky a definice zdroje tepelného výkonu, které byly definovány do výpočetního programu FLUENT.

Při řešení této úlohy byla v úvodu testována konstantní výkonová křivka. Jelikož výsledky tohoto řešení byly takové, že zkoumané teploty při prudkém ochlazení vlivem úbytku spalovaného materiálu a následné dohořívání až na okolní teploty neklesaly, bylo nutné opustit tuto variantu. Proto byl výpočet upřesněn pomocí výkonové křivky závislé na čase, jejíž tvar byl odhadnut z požární zkoušky. Výkonová křivka mohla být také odhadnuta jiným způsobem např. z teorie hoření materiálů.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že matematická simulace pomocí programu FLUENT dosahuje vysoké shody s požárním

experimentem. Teplotní pole, které bylo získáno z měření za pomoci termočlánků, je téměř totožné s numerickou simulací a liší se jen velmi málo. Zachycení průběhu teplot v čase u těchto termočlánků lze také označit za velmi zdařilé, neboť se opět téměř přesně shoduje se skutečností.

Mírné odchylky výsledků mezi numerickými a experimentálními daty, které byly zjištěny, je možno přisoudit následujícímu:

- při požární zkoušce byl výrazný nedostatek kyslíku (kolem 1%), což způsobuje značné problémy při matematické simulaci,
- šíření požáru bylo ovlivněno sníženým obsahem kyslíku u experimentu a okrajovými podmínkami definujícími proudění v matematickém modelu,
- nebyl k dispozici přesný průběh hoření v závislosti na čase a byl hrubě odhadnut z průběhu teplot,
- nebyly ve výpočtu zohledněny změny okrajových podmínek z důvodu otevření dveří apod.,
- generování spalin by bylo vhodné upřesnit na základě experimentu pro dané materiály, využití odhadu ze stechiometrických rovnic pro dokonalé a nedokonalé spalování bylo tudíž také méně přesné.

Hlavním přínosem práce je získání podrobných informací a dat o šíření a chování požáru v obytných objektech. Tyto informace lze dále zobecnit při reálném požáru pro potřebu požárních technických expertiz, a to na základě porovnání vypočtených a naměřených hodnot sledovaných veličin v definovaných pozicích a čase, k záchraně lidských životů a zabránění škod na hmotném majetku, a to ať už z technických závad na elektroinstalaci nebo na elektrických spotřebičích, nebo z důvodu nedbalosti při manipulaci s otevřeným ohněm.

Résumé

The paper describes the simulation of the fire spread on the first floor of the family house. Mathematical model of the house is a true copy of the actual house. The model also has the same boundary conditions as the experiment, including meteorological data. The first part of this work describes large-dimension fire test, basic problems and all the necessary information to understanding the full nature of the job. This is followed by numerical solution of the task. This section covers the mathematical model of fire using a thermal power source. Here are described the basic equations used for solving the problem. Next part of paper contains a description of the physical parameters, the mesh geometry, boundary conditions and heat source definition which were defined by computer program FLUENT.

At the beginning of modeling the source with constant power value was tested. Since the results of this solution were such that the investigated temperature cooling due to a sharp decline in the burned material and then burn up the surrounding temperatures do not fall, it was necessary to abandon this option. The calculation was refined by using performance curves depending on the time, whose

shape was estimated from the fire test. The power curve can also be estimated by other means such as the theory of burning materials.

Based on the gained results it can be noted that mathematical simulation using FLUENT achieves high compliance with the fire experiment. The temperature field, which was obtained from the measurement using thermocouples is nearly identical to the numerical simulation and differs very slightly. Capturing of the time dependent temperature of these thermocouples can also be described as very successful, since it again almost exactly coincides with reality.

Slight deviations between the numerical results and experimental data, which were found could be attributed to the following:

- *The fire test was a marked lack of oxygen (around* 1%*), which causes considerable problems in mathematical simulation.*
- *The fire spread was influenced due to reduced oxygen in the experiment and the boundary conditions defining the flow mathematical model.*
- *There was not a specific combustion running depending on the time and therefore it was roughly estimated from the temperature curves.*
- *In the numerical calculation there were not taken into account the changes of boundary conditions due to the opening doors, etc.*
- *Flue gas generating should be specified on the basis of the experiment for a given material. Using of the stoichiometric equations for flue gas amount estimate in case of perfect and imperfect combustion was therefore also less accurate.*

The main contribution of this work is to obtain detailed information and data about the distribution and behavior of fires in residential buildings. This information can also be generalized to real fire for fire technical expertise based on a comparison of calculated and measured values of the monitored variables in a defined position and time, to save human lives and damage prevent on tangible property, either due to technical defects on electrical installations or electrical appliances, or due to negligence in handling with the open flame.

Poděkování

Tento článek byl řešen v rámci výzkumného projektu č. VD20062010A07 "Výzkum moderních metod pro ZPP a hodnocení nebezpečných účinků požárů na osoby, majetek a životní prostředí".

Literatura

[1] ANGELIS, J., DVOŘÁK, O. *Protokol o matematickém modelování č. 05/MOD/2009*. Praha, 2010. 8 s.

[2] ANGELIS, J., KUNDRATA, T., DVOŘÁK, O. *Protokol o matematickém modelování č. 05/MOD/2010.* Praha, 2010. 10 s.

[3] Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 12.1 – Theory Guide.* 2010.

[4] Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 12.1 – UDF Manual*. 2010
[5] Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 12.1 – User's Guide*. 2010.
[6] DVOŘÁK, O., DUDÁČEK, A. *Zpráva o výsledcích požární zkoušky v rodinném domku v Bohumíně dne 19. 11. 2009*. Praha, Ostrava: TÚPO MV – GŘ HZS Praha a FBI VŠB – TU Ostrava, 2010. 51 s.
[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.* [Závěrečná výzkumná zpráva o výsledcích řešení dílčího výzkumného úkolu DVÚ č. 2 výzkumného projektu VD20062010A07]. Praha: MV – GŘ HZS ČR, TÚPO, 2011. 141 s.
[8] KOZUBKOVÁ, M., BOJKO, M., ZAVILA, O. *Zpráva řešení modelování požáru daného tepelným výkonem a chemickou reakcí.* Ostrava, 2009. 45 s.
[9] MĚRKA, J. *Návrh sendvičové vrstvy s optimálním tepelným odporem pro interiérní aplikace*. [Diplomová práce.] Zlín: Ústav fyziky a materiálového inženýrství, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. 68 s.
[10] STIOVOVÁ, K. *Výzkum spalování dřeva v ohništích malých výkonů.* [Disertační práce.] Ostrava: Katedra energetiky a Výzkumné energetické centrum, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. 218 s.
[11] ZAVILA, O. *Matematické modelování turbulentního proudění, šíření tepla a polutantu v mezní vrstvě atmosféry se zaměřením na tunelové stavby.* [Disertační práce.] Ostrava: Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva, Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. 114 s.