

**TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE**

**DREVÁRSKA FAKULTA**

**KAČÍKOVÁ Danica**

**MAJLINGOVÁ Andrea**

**VEĽKOVÁ Veronika**

**ZACHAR Martin**

**MODELOVANIE VNÚTORNÝCH POŽIAROV S VYUŽITÍM  
VÝSLEDKOV PROGRESÍVNYCH METÓD POŽIARNEHO  
INŽINIERSTVA**

**2017**

*Táto monografia vznikla ako jeden z výstupov projektu APVV-0057-12 „Progresívne metódy zisťovania požiarnotechnických charakteristík materiálov v požiarnej inžinierstve“. Riešiteľmi projektu sú vybraní odborníci z Drevárskej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene a Materiálovotechnologickej fakulty Slovenskej technickej univerzity so sídlom v Trnave.*

**Autori:**

prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD. Katedra protipožiarnej ochrany  
Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

doc. Ing. Andrea Majlingová, PhD. Katedra protipožiarnej ochrany  
Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

Ing. Veronika Veľková, PhD. Katedra protipožiarnej ochrany  
Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

Ing. Martin Zachar, PhD. Katedra protipožiarnej ochrany  
Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

**Recenzenti:**

prof. Ing. Anton Osvald, CSc. Žilinská univerzita v Žiline  
prof. Ing. Milan Oravec, PhD. Technická univerzita v Košiciach

1. vydanie v rozsahu 147 strán  
Vydavateľ: Technická univerzita vo Zvolene  
Rok vydania: 2017

© Technická univerzita vo Zvolene  
© prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD.  
doc. Ing. Andrea Majlingová, PhD.  
Ing. Veronika Veľková, PhD.  
Ing. Martin Zachar, PhD.

Za odbornú úroveň tejto publikácie zodpovedajú autori a recenzenti. Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-228-3006-5

Všetky práva sú vyhradené. Nijaká časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľstva.

## **PREDSLOV**

Počiatky testovania zameraného na zisťovanie parametrov požiaru sa datujú na koniec devätnásteho storočia, kedy boli vyvinuté základné nástroje, ktoré umožňovali vzdialené meranie teplôt a tepelného toku.

Druhá fáza rozvoja v zisťovaní parametrov požiaru a pochopení jeho správania sa datuje na začiatok dvadsiateho storočia. V tomto období sa jednoznačne preukázalo, že je nevyhnutné začať s tvorbou a aplikáciou noriem pre oblasť protipožiarnej bezpečnosti, a to najmä z dôvodu ochrany života a zdravia osôb a ochrany ich majetku. Táto potreba postupne nabrala na celosvetovom význame. V tomto období bolo súčasne v rámci tzv. inžinierskych inovácií vyvinuté elektromechanické zariadenie pre automatické zaznamenávanie údajov realizovaných požiarных experimentov. Tento pokrok v zaznamenávaní údajov umožnil detailné štúdium správania požiaru a jeho nameraných (zaznamenaných) parametrov.

Tretia fáza rozvoja v testovaní požiarotechnických parametrov materiálov a skúmaní správania požiaru sa začala v poslednej polovici dvadsiateho storočia a to vďaka vývoju cenovo dostupného digitálneho zariadenia na zaznamenávanie dát a počítačom, ktoré zlepšili a urýchlili analýzu dát, ako aj vývoj vedecky založených prediktívnych modelov. Široké využitie týchto technológií a výpočtových metód otvorilo teoretický svet, ktorý poskytuje prehľad o detailných prvkoch vo vzťahu k dynamike požiaru a ktorý tiež poskytuje prostriedky na rozvoj lepšieho porozumenia podstaty metód požiarneho skúšobníctva a zmien parametrov požiaru.

Technológia používaná na testovanie požiarotechnických parametrov materiálov a výskum správania požiaru zahŕňa sofistikované vedecké a výpočtové nástroje slúžiace na dosiahnutie významného pokroku vo vývoji noriem pre oblasť požiarnej bezpečnosti. Použitie týchto nástrojov upriamilo pozornosť na zlepšenia, ktoré je potrebné implementovať pri skúšaní a v konečnom dôsledku zvýšení odolnosti materiálov a konštrukcií voči požiaru. Toto by malo zahŕňať, ale neobmedzovať sa len na pokroky v testovaní prvkov stavebných konštrukcií, ich zostáv a systémov pri realistických simuláciách podmienok požiaru a požiarneho zaťaženia. Cieľom týchto nových testov je prispieť k zlepšeniu v oblasti návrhu konštrukčných prvkov novostavieb, resp. pri rekonštrukcii stavieb, s cieľom, aby nekontrolované požiare budov viedli k vyhoreniu bez čiastočného alebo úplného kolapsu, nie k zhoreniu celej budovy, ako tomu bolo napríklad v prípade požiaru viacpodlažnej stavby v Londýne v júni roku 2017.

Tieto nové progresívne technológie zisťovania požiarotechnických parametrov materiálov a parametrov požiaru by mali tiež prispievať k implementácii zlepšení týkajúcich sa vývoja

materiálov odolnejších voči zapáleniu, horľavosti povrchu (formou aplikácie retardérov horenia), rozvoju požiaru, produkcii dymu a toxických plynov, čím by vo významnej miere prispeli k záchrane ľudských životov a následnému zníženiu vysokých nákladov na likvidáciu samotných požiarov.

Osobitnou skupinou je však aj aplikácia progresívnych technológií zisťovania požiarotechnických parametrov materiálov a metód pre modelovanie správania sa požiaru a štúdium správania sa materiálu a stavebných konštrukcií pri požiari v praxi zisťovania príčin vzniku požiarov.

Monografia vznikla ako jeden z výstupov projektu APVV-0057-12 „Progresívne metódy zisťovania požiarotechnických charakteristík materiálov v požiarom inžinierstve“, pričom zahŕňa aj ďalšie čiastkové výsledky výskumu riešeného v rámci tohto projektu. Riešiteľmi spomínaného projektu sú vybraní odborníci z Drevárskej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene a Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Monografia poskytuje komplexný pohľad na historický vývoj požiarneho inžinierstva, problematiku dynamiky požiaru, požiarneho skúšobníctva, t. j. testovania jednotlivých požiarotechnických parametrov materiálov a stavebných konštrukcií, ako aj princípov a možností matematického modelovania zmien parametrov vnútorných požiarov. Významnou časťou monografie je najmä jej experimentálna časť, ktoré je zameraná na experimentálny výskum možností aplikácie výsledkov progresívnych metód a postupov požiarneho inžinierstva do modelovania vnútorného požiaru a zisťovania jednotlivých parametrov požiaru a dymu vznikajúceho pri požiari. V prvom prípade požiar vznikol na kuchynskej linke v kuchyni a v druhom prípade horením matraca postele v spálni jednopodlažnej nadzemnej stavby. V experimentom boli zohľadnené meniace sa parametre odvetrania priestoru a meniaci sa iniciačný zdroj požiaru, resp. príčina a miesto vzniku požiaru. V závere monografie sú odporúčania a prezentované možnosti aplikácie progresívnych metód požiarneho inžinierstva v bezpečnostnej praxi.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-0057-12.

## OBSAH

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1    | VÝVOJ V OBLASTI POŽIARNEHO INŽINIERSTVA.....   | 6   |
| 2    | ZÁKLADNÉ PRINCÍPY HORENIA A DYNAMIKY VNÚTORNÉHO POŽIARU....  | 22  |
| 2.1  | Základy horenia .....  | 22  |
| 2.2  | Dynamika vnútorného požiaru .....  | 26  |
| 3    | PROGRESÍVNE METÓDY ZISŤOVANIA POŽIARNOTECHNICKÝCH<br>CHARAKTERISTÍK MATERIÁLOV V POŽIARNOM INŽINIERSTVE.....         | 55  |
| 3.1  | Materiály a ich základné požiarnotechnické charakteristiky.....  | 56  |
| 3.2  | Metódy zisťovania iniciačných požiarnotechnických charakteristík materiálov .....                                    | 60  |
| 3.3  | Skúšky požiarnej odolnosti konštrukcií.....  | 70  |
| 3.4  | Skúšky rýchlosti šírenia plameňa .....   | 71  |
| 3.5  | Skúšky rýchlosti uvoľňovania tepla .....   | 72  |
| 3.6  | Skúšky zamerané na posúdenie sklonu materiálu šíriť požiar vo fáze flashover .....                                   | 73  |
| 3.7  | Chemicko-analytické metódy zisťovania zloženia materiálov, toxicity splođín<br>horenia a optickej hustoty dymu ..... | 75  |
| 4    | MODELOVANIE ROZVOJA VNÚTORNÉHO POŽIARU .....   | 87  |
| 4.1  | Modelovanie - princípy a metódy.....   | 87  |
| 4.2  | Programové prostredia na báze zónových modelov a CFD systémov vhodné pre<br>modelovanie vnútorných požiarov .....    | 92  |
| 5    | EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....  | 100 |
| 5.1. | Použité programové prostredia .....  | 100 |
| 5.2. | Parametre vstupujúce do modelovania a spôsob ich získania .....  | 101 |
| 5.3. | Výsledky modelovania požiarnych scenárov .....   | 111 |
| 5.4. | Formulácia záverov k výsledkom modelovania vnútorných požiarov .....   | 121 |
| 6    | FORMULÁCIA ODPORÚČANÍ PRE ĎALŠÍ ROZVOJ POŽIARNEHO<br>INŽINIERSTVA .....  | 125 |
| 7    | ZÁVER.....   | 129 |
| 8    | SUMMARY .....  | 132 |
| 9    | ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV .....   | 133 |
| 10   | VECNÝ REGISTER .....   | 136 |
| 11   | ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....   | 138 |
|      | PRÍLOHY.....   | 146 |

# 1 VÝVOJ V OBLASTI POŽIARNEHO INŽINIERSTVA

Jednotlivé oblasti, ktoré sú predstavené, resp. riešené v rámci tejto publikácie, sú súčasťou komplexnej vedeckej disciplíny nazvanej požiarne inžinierstvo.

Požiarne inžinierstvo definovali Martinka a Balog (2014) ako inžiniersku disciplínu zaoberajúcu sa predikciou možných príčin vzniku požiaru, spôsobov a rýchlosti jeho rozvoja, šírenia jeho sprievodných javov (teplo a splodiny horenia) a ich pôsobenia na okolie (osoby, zvieratá, životné prostredie a hmotný majetok), ako aj návrhom opatrení na zníženie pravdepodobnosti jeho vzniku a dopadov jeho sprievodných javov na okolie na akceptovateľnú úroveň.

Pri analýzach požiarne inžinierstvo využíva poznatky, progresívne postupy a metódy z viacerých vedeckých disciplín, najmä z chémie, fyziky, termodynamiky, matematiky, biológie, medicíny a pod.

Korene požiarneho inžinierstva siahajú až do starovekého Ríma, keď cisár Nero nariadil prestavbu mesta po katastrofickom požiari a to s využitím pasívnych metód protipožiarnej ochrany, ako sú oddeľovanie priestorov a použitie nehorľavých stavebných materiálov.

Požiarne inžinierstvo sa po prvýkrát objavilo v USA na začiatku 20. storočia ako osobitná disciplína, oddelená od stavebného, strojníckeho a chemického inžinierstva. Vznikla najmä ako odozva na nové problémy súvisiace s požiarmi, ktoré v tom čase priniesla priemyselná revolúcia.

Odborníci v oblasti protipožiarnej ochrany sa v uvedenej dobe zaoberali najmä navrhovaním metód na ochranu veľkých tovární, a to najmä radiární. Ďalším dôvodom pre vytvorenie samostatnej disciplíny, definovanie postupov a realizáciu výskumu na podporu inovácií boli rozsiahle požiare v prírodnom prostredí a početné požiare v mestách, ktoré počas druhej polovice 19. storočia zničili veľké mestá.

Pokrok v oblasti požiarneho inžinierstva a vývoj protipožiarnych systémov a zariadení podporil však najmä vznik poisťovníctva.

V roku 1903 bol na Armour Institute of Technology (neskôr sa stal súčasťou Illinois Institute of Technology) otvorený prvostupňový študijný program požiarneho inžinierstva.

Príchod 20. storočia, aj vďaka skúsenostiam s predchádzajúcimi katastrofickými požiarimi, priniesol zmeny v stavebných predpisoch, ktoré mali lepšie chrániť ľudí a majetok pred požiarom.

V druhej polovici 20. storočia sa požiarne inžinierstvo objavuje už ako samostatný inžiniersky odbor.

Ďalšími faktormi, ktoré prispeli k ďalšiemu rozvoju tohto odboru, bolo ustanovenie profesie požiarneho inžinierov v Spojenom kráľovstve v roku 1918 a založenie Spoločnosti požiarneho inžinierov v USA v roku 1950, ale aj vznik nezávislého poradenstva v oblasti protipožiarnej ochrany a tvora technických noriem pre oblasť protipožiarnej ochrany.

Jednou z oblastí požiarneho inžinierstva riešenou v tejto monografii je oblasť požiarneho skúšobníctva.

Snaha o pochopenie požiaru sa datuje už do doby pred 2,5 miliónmi rokov, do paleolitu, kedy prvý primitívny človek pozoroval žiaru plameňa. Od doby prvých pozorovaní ľudstvo pomaly dospelo k rozvinutiu poznatkov o horení a požiaroch a spôsoboch ich využitia.

Prvé pozorované požiare boli pravdepodobne spôsobené prírodnými javmi, bleskom, alebo ako dôsledok vulkanickej činnosti v danej oblasti. Ľudia žijúci v tomto období zároveň pozorovali, že tieto požiare môže uhasiť dážď alebo jeho šírenie môže zastaviť vodný tok. Naučili sa izolovane premiestňovať oheň z jedného miesta na druhé. Na základe tohto poznania bolo ľudstvo schopné rozvinúť koncept využívania ohňa. Avšak ešte stále si neboli vedomí, že jednou zo základných zložiek potrebných pre horenie je kyslík. Poznali len koncept, že kombináciou tepla a paliva vzniká oheň. Tieto poznatky umožnili ľuďom v prípade potreby založiť oheň a vytvoriť základ pre prácu s ohňom (požiarom) v budúcnosti.

Poznatky tejto primitívnej fyzikálnej vedy o teple a požiaroch v kombinácii s poznatkami z matematiky vytvorili základ pre budúci rozvoj požiarneho skúšobníctva. Postupom času ľudstvo nevyužívalo oheň len v domácnostiach, ale stal sa predmetom prvých požiarneho skúšobníctva vykonávaných v súvislosti s vývojom zbraňových systémov.

Je známe, že „grécky oheň“ sa používal vo vojnách už v siedmom storočí, ako aj skutočnosť, že Číňania používali plameňomet už v desiatom storočí (Lawson 2009).

Významný posun v oblasti požiarneho skúšobníctva bol zaznamenaný v súvislosti s rozvojom používania sústavy arabských čísel, aritmetikou, algebrou, geometriou, trigonometriou

a výpočtovými metódami. Poznatky týchto vedeckých disciplín a výpočtové možnosti poskytli väčšinu základných nástrojov pre študovanie parametrov požiaru.

Tieto matematické nástroje sa neskôr používali pre štúdium správania sa požiaru po stáročia. Rozvoj štatistických metód poskytol vývoj základných metodických postupov pre analýzu výsledkov výskumu a údajov získaných z požiarneho skúšobníctva. To zároveň umožňovalo optimalizovať metódy požiarneho skúšobníctva takým spôsobom, aby poskytovali zmysluplné a opakovateľné výsledky. Okrem toho, štatistické metódy ponúkajú aj nástroje, ktoré sú nápomocné pri predikcii správania požiaru.

Ďalšou fázou v rozvoji požiarneho skúšobníctva bolo zapojenie nového parametra do merania, a to času.

Takmer všetky požiarne testy sa v súčasnosti zakladajú na meraní parametra čas a tiež mnohé výsledky testov sú uvádzané v jednotkách času. Koncept času bol dôležitý hneď od počiatku.

Pred tisíckami rokov ľudia v Afrike, Ázii a východnej Európe vyvinuli elementárne prostriedky na meranie času, a to najskôr pomocou slnečných lúčov (slnečné hodiny) a postupom času boli vyvinuté vodné hodiny a neskôr i mechanické hodiny.

To nakoniec viedlo k zvýšeniu presnosti s veľkým prelomom v čase, keď Angličan John Harrison získal v roku 1714 cenu Britskej vlády. Jeho vynálezom boli mechanické hodiny s chybou len jedna pätina sekundy za deň (Lawson 2009).

V dvadsiatych rokoch 20. storočia získali časomiere ešte vyššiu presnosť a to najmä v súvislosti s vývojom elektronických hodín na báze kremenných kryštálov.

Moderné hodiny, či už mechanické alebo elektronické, sa bežne nachádzajú vo vybavení dnešných laboratórií a predstavujú nepostrádateľný nástroj i pri aplikácii súčasných progresívnych metód požiarneho skúšobníctva.

Vedecké počiatky požiarneho skúšobníctva boli položené v 16. až 18. storočí.

Jednou z prvých podrobnejších prác, ktoré sa stali všeobecne publikované v súvislosti s opisom procesu horenia, bola séria detských prednášok vedených Michaelom Faradayom v Royal Institution of Great Britain v roku 1825. Vydal spolu šesť prednášok, ktoré tvorili sériu s názvom „Chemická história sviečky“. Tieto prednášky Kráľovskej inštitúcie v priebehu dvadsiatych rokov 20. storočia poskytli prehľad o tom, čo bolo známe o horení a požiaroch v tom čase (Faraday 1988).



V roku 1885 Mallard a Le Chatelier publikovali prácu, poskytujúcu omnoho detailnejšiu analýzu procesov horenia, pričom upozorňujú na skutočnosť, že práve spätné šírenie tepla jednotlivými vrstvami plynu je riadiacim mechanizmom šírenia plameňa (Glassman 1977).

Práce vytvorené týmito a ďalšími prvými priekopníkmi v oblasti požiarneho inžinierstva nasledovali mnohí výskumníci 20. storočia, ktorí ďalej definovali procesy horenia a vlastnosti plameňa. Tieto sa vo veľkej miere využívajú aj v súčasných metódach požiarneho skúšobníctva.

Ďalší pokrok vo vývoji požiarneho skúšobníctva bol predznamenaný nastupujúcimi možnosťami merania teploty.

Taliansky astronóm Galileo Galilei si uvedomil potrebu merať teplo a v roku 1593 vyvinul termoskop (Miller, Dillon, Smith 1980). Toto jednoduché zariadenie bolo skonštruované zo sklenenej banky s pripevnenou sklenenou trubicou umiestnenou vertikálne do stredu sklenenej misy obsahujúcej vodou a vystavené okolitému priestoru. Tento prístroj nebol vhodný na meranie teplôt vznikajúcich pri požiari, ale poskytol nástroj na štúdium účinkov zmeny teploty. Asi o 120 rokov neskôr v roku 1714 vynášiel nemecký nástrojár Gabriel Fahrenheit teplomer s ortuťou. S týmto prístrojom vyvinul aj teplotnú stupnicu Fahrenheita. Avšak teplotná stupnica vyvinutá v roku 1742 švédskym astronómom Andersom Celsiusom sa stala najrozšírenejšou teplotnou stupnicou, a to i v požiarom skúšobníctve (Nordmann 1974).

Po zavedení merania teploty do požiarneho skúšobníctva došlo neskôr k tvorbe prvých koncepcií tepla a termodynamiky.

Koncept tepla nebol pochopený až do konca 18. storočia. Prvotné chápanie tohto konceptu je zrejmé až zo štúdií a spisov grófa Rumforda (tiež známeho ako Benjamin Thompson) narodeného v severnom Woburne v štáte Massachusetts (Miller, Dillon, Smith 1980). Ten v roku 1789 predstavil Kráľovskej spoločnosti v Londýne esej, ktorá popisovala, ako teplo súvisí s pohybom a trením. Táto práca vznikla na základe pozorovaní a experimentov vykonaných pri vyvrtávaní delových hlavní (Ripley 1965). Tieto zistenia vytvorili predpoklady pre pochopenie tepla a termodynamiky, ktoré sú ďalšími prvkami tvoriacimi základ technológií požiarneho inžinierstva.

V 40. rokoch 19. storočia vydal nemecký lekár Julius Mayer ďalšiu prácu o chápaní tepla. Táto práca o teple a tepelnom toku bola ďalej prepracovaná anglickými fyzikmi Jamesom Jouleom a nemeckým fyzikom Hermannom von Helmholtzom (Miller, Dillon, Smith 1980). Úsilie každého z týchto troch odborníkov zaoberajúcich sa teplom vo vzťahu k vnútornej energii fyzikálnej sústavy viedlo k formulácii Prvého termodynamického zákona.

Následne v roku 1850 nemecký fyzik Rudolf Clausius zadefinoval proces prenosu tepla, čo viedlo k formulácii Druhého termodynamického zákona.

Ďalšou významnou oblasťou vo vývoji požiarneho skúšobníctva, ale aj samotného požiarneho inžinierstva, je prenos tepla a tepelného žiarenia. V 17. storočí anglický fyzik Sir Isaac Newton a holandský fyzik Christiaan Huygens predstavili konkurenčné teórie o vlastnostiach svetla. Newton publikoval prácu týkajúcu sa výskumu svetla s názvom „Optika“ a uviedol, že svetlo sa skladá z veľmi malých častíc, ktoré putujú po priamke (Ripley 1965). Naopak, Huygens predpokladal, že svetlo je fenomén, pozostávajúci z vln, ktoré putujú po priamke (Miller, Dillon, Smith 1980). Vsúčasnosti sú tieto práce známe aj ako Newtonova časticová teória svetla a Huygensova vlnová teória svetla.

Problematiku svetla sa nepodarilo vyriešiť až do začiatku 20. storočia, kedy Maxwell zistil, že svetlo súvisí s elektromagnetickými vlnami a Max Planck vysvetlil súvisiace so svetelným žiarením. Týmto sa položili základy klasickej fyziky. Došlo k zjednoteniu elektromagnetického spektra, pričom sa preukázalo, že svetlo, tepelné žiarenie, röntgenové lúče a rádiové vlny sú tvorené elektromagnetickými vlnami a líšia sa len vlnovou dĺžkou a frekvenciou (Ripley 1965).

Navyše sa zistilo, že svetlo môže existovať vo forme fotónov alebo extrémne malých častíc, ako to predpokladal Newton.

Tieto poznatky spolu s poznatkami o prenose tepla vytvorili základ pre ďalšie pochopenie a meranie tepelného žiarenia.

Ďalšou popisovanou oblasťou je oblasť dynamiky kvapalín.

Začiatkom 18. storočia, výskum kvapalín viedol Holanďana Daniela Bernoulliho k formulácii tzv. Bernoulliho rovnice. Táto práca matematicky vysvetľuje hydrodynamické vlastnosti kvapalín a otvára priestor pre vývoj nových meracích prístrojov, ktorých aplikácia by bola efektívna pri vývoji metód požiarneho skúšobníctva.

Pod vedením Bernoulliho vytvoril Francúz Henri Pitot v roku 1732 zariadenie vhodné na meranie prietoku kvapaliny. Toto zariadenie sa nazýva Pitotova trubica (Streeter 1962).

Pitotove trubice sa v požiarnej skúšobníctve využívajú vo veľkej miere, avšak pri vystavení vysokej intenzite požiaru a zadymeniu môžu spôsobiť značné problémy.

Vyššie uvedené matematické, vedecké a technické inovácie poskytli základ pre prvú revolúciu v požiarnom skúšobníctve – vývoj meracích zariadení.

Pochopenie koncepcie teploty a tepelného toku vytvorilo základ pre následnú vedeckú a technickú revolúciu. Táto revolúcia, ktorá viedla k vzniku súčasného požiarného skúšobníctva, začala až v pomerne neskorom období, v 19. storočí, keď boli vyvinuté základné nástroje umožňujúce meranie teploty a tepelného toku. Čo je ešte dôležitejšie, toto obdobie prvej revolúcie zahŕňalo aj vývoj technológií umožňujúcich diaľkové meranie teplôt a tepelného toku. Keďže pokusy spájajúce sa s výskumom požiaru nesú so sebou aj značné riziká ohrozujúce život a zdravie, je nevyhnutné, aby sa meranie jednotlivých parametrov požiaru ovplyvňujúcich jeho správanie vykonávalo bezkontaktné, t.j. na diaľku. Schopnosť merania požiarnych javov na diaľku umožnilo rozvoj požiarného skúšobníctva až na súčasnú úroveň. Objavy ako „termoelektrický efekt“ a termodynamika viedli k vytvoreniu nástrojov pre kalorimetriu, umožňujúcich meranie teplôt a tepelného toku.

Od začiatku až do polovice 19. storočia sa mnoho výskumníkov venovalo štúdiu procesov vo fyzike, ktoré viedli k vývoju termočlánku. Svoj podiel na jeho vývoji mali Thomas Johann Seebeck, Jean Charles Peltier a William Thomson (lord Kelvin). Ich práce stanovili zásady pre konštrukciu a používanie termočlánkov (Considine 1974).

Vytvorenie termočlánku viedlo čoskoro k vývoju ďalších meracích zariadení pre požiarné skúšobníctvo. Jedným z týchto zariadení bol medený kalorimeter. Už v roku 1876 Maxwell konštruoval a používal medené kalorimetre na meranie tepelného toku vo svojich laboratórnych experimentoch (Harman 2002). Navyše v období rokov 1879 až 1884 Stefanov-Boltzmannov zákon doplnil predchádzajúcu Planckovu prácu a stanovil pracovné parametre pre tok energie vyžarovaný tepelnými systémami čierneho telesa (Rohsenow, Hartnett 1973). Štúdiu o žiarení čierneho tela spracovali rakúski vedci Josef Stefan a Ludwig Boltzmann. Spomínané dve zariadenia, termočlánok a medený kalorimeter, vytvorili podmienky pre realizáciu bezkontaktných meraní teploty a tepelného toku v požiarnom skúšobníctve.

Ako už bolo spomenuté vyššie, pre požiarné skúšobníctvo je z hľadiska bezpečnosti obsluhy potrebné merať prietok plynov vznikajúcich pri požiari bezkontaktné. Ranné práce Bernoulliho a Pitota položili základ pre meranie prietoku plynu. Pitotova trubica však nefungovala dobre pri určitých typoch požiarnych skúšok. Na meranie nízkych prietokov plynov vznikajúcich pri požiari niektorí výskumníci použili aj iné, elektricky ovládané zariadenie, známe ako horúci drôtový anemometer, opísané Louisom Kingom (1914).

Obe tieto zariadenia zvyčajne pracovali dobre, až pokým teploty neboli príliš vysoké alebo sa nezačal tvoriť dym. Problémom je, že častice dymu sa môžu zhromažďovať na meracom drôte sond alebo vo vnútri otvoru Pitotovej trubice, ovplyvňovať samotný proces merania až znehodnotiť celé meracie zariadenie. Tieto problémy si uvedomovali McCaffrey a Heskestad a vyvinuli nové robustné prostriedky na meranie prietoku plynov vznikajúcich pri požiari (McCaffrey, Heskestadt 1976).

Toto meracie zariadenie, obojsmerná sonda, vyvinutá v sedemdesiatych rokoch minulého storočia, mala síce malý, ale významný vplyv na rozvoj požiarneho skúšobníctva. Obojsmerná sonda umožnila merať prietoky v oboch smeroch prostredníctvom vstupov jediným zariadením. Robustný charakter tohto zariadenia umožňuje používať na meranie veľmi nízkych prietokov plynu ale aj na meranie vysokých prietokov plynu produkovaných intenzívnymi požiarmi.

Navyše je menej pravdepodobné, že meracie zariadenie bude ovplyvnené hustým dymom. Aplikácia obojsmernej sondy, ktorá je spojená s modernými tlakovými prevodníkmi a systémami zaznamenávania dát, už pomohla vyriešiť niekoľko problémov a umožňuje presné meranie prietoku plynu pre širokú škálu podmienok požiarneho skúšok.

Hoci je požiar predmetom záujmu výskumu už tisícov rokov, vývoj vedecky založených skúšok požiarnej bezpečnosti stavieb je predmetom záujmu menej ako 300 rokov. Prvé odkazy týkajúce sa skúšok požiarnej bezpečnosti stavieb, poukazujú na Obadiaha Wylda, ktorý vyvinul retardér horenia pre tkaniny a vďaka tomu získal v roku 1735 britský patent. Je však zrejmé, že tento patent by nebol získaný bez použitia určitej formy požiarnej skúšky na kvantifikovanie účinnosti daného retardéra horenia. Prácu Wylda doplnil Gay-Lussac, ktorý realizoval rozsiahle štúdie o požiarnej odolnosti tkanín používaných ako divadelné opony. V roku 1821 Gay-Lussac zverejnil zoznam látok, o ktorých sa zistilo, že účinne zlepšujú požiaru odolnosť (Gay-Lussac 1821).

Rozvoj požiarneho skúšobníctva v začiatkoch 20. storočia poznamenáva nástup zariadení, ktoré sú schopné na diaľku merať a automaticky zaznamenávať namerané údaje. Tento pokrok v zaznamenávaní údajov umožnil podrobnú štúdiu prechodného správania požiaru. Vtedajší výskumníci získali možnosti presnejšieho merania správania požiaru, čo umožnilo rýchlejšie získavanie poznatkov o dynamike požiaru. Výskumníci ďalej využívali tieto nové poznatky na zlepšenie vedecky založených metód a štandardov pre vykonávanie požiarneho skúšok a to v celosvetovom meradle.

Z doterajšieho popisu vývoja požiarného skúšobníctva je zrejmé, že jediné testy, ktoré boli vykonávané, boli veľkorozmerové.

Malorozmerové alebo laboratórne požiarné skúšky stavebných materiálov za účelom zistenia ich iniciačných vlastností realizoval už v roku 1912 Princ, ktorý vyvinul pec na štúdium zápalnosti rôznych druhov dreva a na skúmanie vplyvu retardáčnych úprav na zapálenie dreva. Táto skúšobná metóda bola ďalej rozvíjaná počas niekoľkých desaťročí v rámci britského štandardizačného procesu, ale tiež Ingbergom v roku 1945 a Setchkinom v roku 1949. Táto metóda požiarnej skúšky bola nakoniec v roku 1958 prijatá komisiou ASTM (American Society for Testing and Materials) ako testovacia metóda pre hodnotenie plastov (ASTM E136). Táto skúška sa používa na štúdium horľavosti materiálov a odpovedá na otázku, či materiály po vystavení vysokým teplotám produkujú teplo a ich horenie sa prejavuje plameňom.

S posudzovaním vplyvu vybavenia priestoru (nábytku) na vznik a šírenie požiaru sa začalo v období rokov 1918 až 1924 v USA, po sérii smrteľných požiarov nitrocelulóзовých kinových filmov v divadlách a budovách slúžiacich na výmenu filmov. Americká NFPA (National Fire Protection Association) následne v júli 1924 predstavila skúšky na hodnotenie horľavosti kinového filmu (NFPA 1924).

Horľavosť interiérových povrchových úprav, vrátane podlahových krytín, bola riešená až v roku 1926 (NFPA 1926). Nebezpečenstvo vzniku požiaru vo vzťahu k interiérovým úpravám bolo opätovne zdôraznené v 40. rokoch 20. storočia po veľkých požiaroch nočného klubu, troch hotelov a jednej nemocnice, ktoré sa odohrali v USA v rozmedzí rokov 1942 – 1949, a ktoré spôsobili veľké straty na životoch, rozsiahle škody na majetku a viedli k veľkým finančným stratám (Yuill 1962). Ako odozvu na tieto požiare sa Ingberg a Steiner rozhodli vyvinúť metódu požiarnej skúšky na meranie požiarnej odolnosti povrchových úprav a podlahových krytín. Vyvinuli veľkú tunelovú pec na sledovanie rýchlosti šírenia plameňa po povrchu. Táto skúšobná metóda bola v roku 1950 prijatá aj komisiou ASTM (ASTM E84).

Vývoj postupov veľkorozmerových požiarnych skúšok sa stretol aj s negatívnymi postojmi. Dôvodom boli zvýšené náklady na výrobu a samotné požiarné skúšky materiálov. Preto bolo snahou viac rozvíjať laboratórne (malorozmerové) testovanie.

To nakoniec vyústilo do vývoja dvoch skúšobných metód horľavosti povrchov, ktoré využívali menšie zariadenia, ale aj vzorky oveľa menšie ako tie, ktoré boli potrebné pre skúšky vo veľkorozmerovom tuneli. Jedna z týchto skúšobných metód bola vyvinutá v roku 1951 Ministerstvom poľnohospodárstva USA (Peters, Eickner 1962). Tento test bol označený ako

tunelová metóda FPL 8-FT. Test je podobný testu ASTM E84, ale je má oveľa menšie rozmery. Druhou skúšobnou metódou je test horľavosti povrchu s aplikáciou metódy radiačného panelu. Táto testovacia metóda bola prijatá v roku 1962 aj komisiou ASTM (ASTM E162). Skúšobná metóda je založená na použití vzoriek, ktoré sú menšie ako jeden meter. Tieto dve skúšky sa primárne používajú na meranie horľavosti povrchu stien a stropných materiálov. Existuje však aj modifikovaná verzia testu ASTM E84, ktorú používa Underwriters Laboratories (UL 992) na hodnotenie požiarneho správania podlahových krytín (drevených, PVC a ďalších).

V 50. – 60. rokoch 20. storočia sa čoraz populárnejším druhom podlahovej krytiny využívaným najmä v domácnostiach, kancelárskych priestoroch, hoteloch a nemocniciach stali koberce. S tým súvisel i rozvoj požiarnej skúšky zameraných na testovanie tohto druhu materiálu. Výskum sa v tejto oblasti zameriaval na zodpovedanie otázky akou mierou prispieva koberec k šíreniu požiaru v stavbe (Benjamin, Davis 1979). Prvé pokusy s hodnotením šírenia plameňa po koberci boli urobené opäť v USA v roku 1965. Už v apríli 1970 bola ustanovená prvá požiarne skúška, tzv. „pilulková skúška“ (Benjamin, Davis 1979).

„Pilulková skúška“ bola vykonaná v prostredí laboratórnej miestnosti, pričom na skúšobnú vzorku nebol aplikovaný žiadny vonkajší tepelný tok. Aj preto podmienky skúšky neboli reprezentatívne, najmä z dôvodu, že nereprezentovali podmienky prostredia požiaru, ktoré je charakteristické tým, že podlahové krytiny prijímajú radiačnú energiu z rozvíjajúceho sa požiaru.

V období rokov 1966 – 1974 bola Zabowakym a Armstrongom vyvíjaná ďalšia metóda požiarnej skúšky podlahových materiálov, pri ktorej sa využíval radiačný panel pre podlahové krytiny (Adams 1976).

V čase, keď Armstrong pracoval na vývoji svojho testovacieho zariadenia, americký Národný úrad pre normalizáciu (NBS) vynakladal úsilie najmä na zlepšenia v oblasti kvantifikácie správania sa požiaru v koridoroch budov (Denyes, Quintiere 1973).

Práca Denyesa a Quintiereho rozvinula poznatky súvisiace s dôležitým parametrom šírenia plameňa, ktorý bol nazvaný „kritická hustota tepelného toku“.

Vďaka spojeniu prác Armstronga a Adamsa bol nakoniec navrhnutý skúšobný postup, ktorý bol prijatý v roku 1978 ako testovacia metóda ASTM E648. Modifikovaná verzia skúšobnej metódy E648 bola tiež použitá na meranie šírenia plameňa z tepelných izolačných materiálov a bola prijatá v roku 1983 ako testovacia metóda ASTM E970.

Začiatok 20. storočia bol okrem pokroku v iných oblastiach požiarneho inžinierstva spojený aj s pokrokom v oblasti testovania dymu a toxicity splodín horenia vznikajúcich pri požiari.

Negatívne účinky dymu vznikajúceho pri požiari na človeka pozorovali už prví ľudia. Neskôr v roku 1823 po skúsenostiach s úmrtím ľudí, ktoré spôsobilo nadýchanie sa splodín horenia pri hasení požiarov na palubách lodí, Charles A. Deane (britský vynálezca potápačského vybavenia) patentoval jeden z prvých funkčných dýchacích prístrojov (Newton, Partington 1825).

Ochrana pred účinkami dymu bola neskôr prioritne zameraná na budovy, v ktorých sa počas dňa vyskytoval veľký počet ľudí. Najväčšia pozornosť bola na začiatku 20. storočia venovaná najmä výrobným závodom a školám.

V USA v apríli 1913 NFPA uverejnila článok s názvom „Hasič ako pedagóg“. Tento článok navrhoval doplniť obsah školských osnov o problematiku požiarnej prevencie a správania žiakov s cieľom zabránenia vdýchnutiu dymu pri požiari (používanie vlnených pokrývok hlavy a mokrych uterákov).

V roku 1918 Richards upozornil na potrebu vytvorenia štandardov pre protipožiarnu ochranu školských zariadení. Jeho spisy obsahovali toto vyhlásenie: „Riziká, ktoré sa spájajú s dymom, si vyžadujú osobitnú pozornosť z hľadiska životného prostredia, preto je na projekty východov z budov kladená zvýšená starostlivosť“.

V roku 1933 opísal Ferguson nebezpečenstvá, ktoré spôsobuje dym a iné plyny vznikajúce pri požiari, pre život a zdravie človeka.

V roku 1944 Underwriters Laboratories v USA predstavili prvú skúšobnú metódu na analýzu dymu a splodín horenia, založenú na použití tunela, simulujúceho šírenie plameňa po povrchu, označovaného aj ako „Steiner tunel“ (neskôr bola táto metóda štandardizovaná ako ASTM E84). Odvzdušňovacie potrubie skúšobného zariadenia zahŕňalo svetelný lúč a fotoelektrickú bunku, ktorá merala produkciu dymu. Toto potrubie slúžilo zároveň na odber vzoriek plynov vznikajúcich počas horenia za účelom určenia toxicity a iných vlastností dymu (Steiner 1944).

Napokon NFPA v roku 1964 zverejnila správu, ktorá opisovala prvú metódu požiarnej skúšky, ktorá bola orientovaná najmä na riešenie ohrození spôsobených dymom. Táto skúška (vyvinutá Rohmom a Hassom) bola navrhnutá tak, aby bolo možné merať hustotu dymu vo vzťahu k schopnosti človeka vidieť značku východu v zadymenom prostredí. Zadymenie v priestore pochádzalo z horenia skúšobného materiálu.

V roku 1966 predstavil podobnú skúšobnú metódu pre meranie produkcie dymu z horiacich materiálov aj Národný úrad pre normalizáciu. Táto bola v roku 1979 prijatá komisiou ASTM ako ASTM E662, t. j. normová skúšobná metóda pre stanovenie špecifickej optickej hustoty dymu produkovaného pevnými materiálmi (ASTM 2006).

Ďalšiemu rozvoju v oblasti vývoja meracej techniky pre analýzu dymu a produktov horenia napomohol vývoj v oblasti počítačového matematického modelovania dynamiky požiaru a s ním spojená potreba predikovať zmenu parametrov zadymenia v priestore.

Tieto technologické požiadavky vyústili do vývoja metódy testovania dymu, ktorá môže okrem merania špecifickej optickej hustoty merať aj hmotnosť optickej hustoty dymu produkovaného horiacimi materiálmi. Veľká časť pôvodnej vedeckej práce na vývoji tejto testovacej metódy sa uskutočnila v Európe. Toto skúšobné zariadenie vo svojom návrhu a konštrukcii využilo vtedajšie poznatky a technologický pokrok.

V roku 1998 komisia ASTM schválila novú skúšobnú metódu – ASTM E1995. Ide o normovú skúšobnú metódu merania zadymenia s využitím kónického zdroja žiarenia v uzavretej komore, so skúšobnou vzorkou orientovanou horizontálne (ASTM 2004).

Ako je uvedené v názve normy, zariadenie používa kónický zdroj tepelného žiarenia a navyše má snímač zaťaženia na meranie rýchlosti úbytku hmotnosti.

Fakt, že produkty horenia pri požiaroch sú toxické, je známy pravdepodobne už tisícky rokov. Avšak mnohé vedecké nástroje a poznatky potrebné na vysvetlenie, prečo je dym a splodiny horenia toxické, neboli k dispozícii do 19. – 20. storočia. Preto k hlbšiemu pochopeniu toxicity požiaru nedošlo až do začiatku polovice 20. storočia.

Riešenie problematiky toxicity požiaru sa objavilo v prácach mnohých výskumníkov v 60. a 70. rokoch 20. storočia. V tomto období možno medzi kľúčové zaradiť práce: Zikrie (1973) „Otravy dymom pri požiaroch“, Einhorn (1973) „Dym a prežitie počas požiaru“ a Reinke a Reinhardt (1973) „Požiare, toxicita a plasty“. Vďaka nim sa problematika toxicity požiaru dostala do popredia.

Výskumné úsilie pokračovalo aj v priebehu sedemdesiatich rokov minulého storočia. Národný úrad pre normalizáciu vyvinul skúšobnú metódu testovania toxicity požiaru (Alaire, Barrow 1977), ktorá bola v roku 1995 prijatá aj komisiou ASTM – ASTM E1678-02, t. j. normová skúšobná metóda na meranie toxicity dymu pre účely jej aplikácie v analýze rizika požiaru.



V 50. rokoch 20. storočia boli ako rozhodujúce faktory rozvoja požiaru označené rýchlosť horenia a rýchlosť uvoľňovania tepla materiálov. Pre účely zisťovania týchto parametrov požiaru bol v USA v roku 1959 vyvinutý prvý kalorimeter umožňujúci merať rýchlosť uvoľňovania tepla.

Okrem toho v roku 1959 publikoval Emmons článok, v ktorom zdôraznil potrebu kvantifikovať celkovú rýchlosť uvoľňovania energie v závislosti od času a priestorovú distribúciu rýchlosti uvoľňovania tepla. Tieto dve potreby vyzdvihli kalorimeter umožňujúci meranie rýchlosti uvoľňovania tepla na vysokú úroveň dôležitosti.

Hlavné kroky vo vývoji kalorimetrie zameranej na meranie rýchlosti uvoľňovania tepla sa uskutočnili až začiatkom sedemdesiatych rokov minulého storočia. V tej dobe sa prejavovali dve snahy o pokrok v tejto oblasti. Prvá snaha bola vedená Smithom z Ohio State University a druhá Parkerom z Národného úradu pre normalizáciu (NBS).

Smithov kalorimeter bol založený na meraní pomocou diferenciálnych termočlánkov umiestnených v prúde splodín horenia. Parkerov kalorimeter NBS pracoval ako zariadenie s konštantnou teplotou s pomerným znížením meraného prídavného prúdu splodín horenia rovnajúceho sa uvoľnenému teplu zo skúšobnej vzorky. Údaje z týchto dvoch systémov boli zhromažďované záznamníkmi s pásovými grafmi a rýchlosť uvoľňovania tepla sa stanovovala z týchto údajov až po skončení skúšky.

Smithov kalorimeter prešiel normalizačným procesom a bol prijatý ASTM ako skúšobná metóda ASTM E906, t. j. normová skúšobná metóda pre teplo a viditeľnú rýchlosť uvoľňovania dymu pre materiály a výrobky s využitím metódy aplikácie súboru termočlánkov.

Napriek tomu, že tieto metódy poskytli prehľad o požiarom správaní materiálov, ich merania konvektívnej entalpie nedokázali zachytiť sálavé a tepelné straty na stenách prístroja.

Príchod informačného veku priniesol pokrok aj do požiarneho skúšobníctva, poskytol základ pre implementáciu progresívnych metód zisťovania rýchlosti uvoľňovania tepla z horiacich materiálov.

Najväčší pokrok v tejto oblasti nastal v druhej polovici 20. storočia, s vývojom cenovo dostupných stolových počítačov, data loggerov, počítačom podporovanej analýzy údajov a vedecky založených prediktívnych modelov.

Implementácia výpočtovej techniky do požiarneho inžinierstva otvorila teoretický svet poskytujúci hlbšie pochopenie jednotlivých prvkov dynamiky požiaru a poskytuje aj prostriedky na rozvoj lepšieho pochopenia postupov realizácie požiarnej skúšky.

Tieto pokroky vychádzajúce z implementácie výpočtovej techniky do požiarneho skúšobníctva viedli k postupnému vývoju nových skúšobných metód. V súčasnosti sa mnohé požiarne skúšky vykonávajú pomocou vysokorýchlostných prenosných počítačov. Tieto nástroje významným spôsobom podporili výskum v oblasti fyziky požiaru a získavanie poznatkov o chémii požiaru, čo umožnilo rýchly vývoj a validáciu teórie požiaru, požiarnej modelov a metód požiarnej skúšky.

Jedným z ďalších významných počínov vyplývajúcich z implementácie výpočtovej techniky do požiarneho skúšobníctva bol vývoj kalorimetrie založenej na spotrebe kyslíka.

V roku 1977 Beason a Alvares prezentovali svoje poznatky z experimentov, v ktorých aplikovali postup využívajúci spotrebu kyslíka na štúdium horenia drevených a plastových klietok v miestnosti s obmedzeným odvetraním.

V rovnakom čase Parker používal aj techniky spotreby kyslíka na skúmanie požiarneho prostredia v tunelovom skúšobnom zariadení, vid' ASTM E84 (Parker 1977).

Techniky používané obidvomi výskumníkmi boli založené na pôvodnej práci Thorntona, ktorý v roku 1917 publikoval článok o vzťahu kyslíka a spaľovacieho tepla organických zlúčenín.

V roku 1978 Huggett zameral úsilie na definovanie vedeckého orgánu potrebného pre vývoj robustného kyslíkového kalorimetrického systému. V decembri toho istého roka predstavil príspevok s názvom „Kalorimetria spotreby kyslíka“. Tento dokument vytvoril základ pre zdokonalenie a vývoj budúcich metód požiarneho skúšobníctva pomocou kalorimetrie založenej na spotrebe kyslíka.

V tom istom čase Parker, kolega Huggetta, pracoval na koncepcii kalorimetrie a jej uvedením do praxe. Parker spolu s Sensenigom (1978) postavil a testoval prvý kalorimeter na meranie rýchlosti uvoľňovania tepla v závislosti na spotrebe kyslíka. Tento kalorimeter na meranie spotreby kyslíka bol predchodcom súčasného kónického kalorimetra.

Kalorimetriu založenú na spotrebe kyslíka možno považovať za jednu z najdôležitejších skúšok požiarneho skúšobníctva. Poskytuje účinný nástroj na analýzu parametrov správania požiaru ako na úrovni laboratórnych, tak i veľkorozmerových požiarnej skúšky.

V roku 1982 americký Národný úrad pre normalizáciu (NBS) informoval o vývoji veľkorozmerného kalorimetra na spotrebu kyslíka na meranie rýchlosti uvoľňovania tepla nábytku (Babrauskas et al. 1982, Babrauskas 1982).

Uplatnenie a postupy aplikácie nábytkového kalorimetra preukázali Lawson, Walton a Twilley (1984) v správe, v ktorej popisali výsledky hodnotenia 23 rôznych druhov interiérového vybavenia, vrátane stoličiek, pohoviek, knižnice, skriňového šatníka a posteľnej bielizne.

Postupom času bola technológia merania rýchlosti uvoľňovania tepla prostredníctvom nábytkového kalorimetra vylepšená Parkerom, Babrauskasom, Janssensom a ďalšími a stala sa rozhodujúcou meracou metódou viacerých laboratórnych, strednorozmerových a veľkorozmerových požiarnych skúšok nielen v USA a Kanade, ale na celom svete.

Už z prehľadu histórie vývoja požiarneho skúšobníctva je zrejmé, že väčšina tu uvedených prístupov k zisťovaniu jednotlivých požiarotechnických parametrov materiálov a stavebných konštrukcií a parametrov požiaru bola vyvinutá v USA, kde sa postupne stali súčasťou novo vytváraných ASTM testovacích metód a noriem. Tieto boli neskôr transponované aj do európskych a slovenských noriem v oblasti požiarnej bezpečnosti materiálov a stavebných konštrukcií. V súčasnosti sú priebežne aktualizované a dopĺňané, a to najmä vo vzťahu k vývoju v oblasti meracej techniky. Jednotlivé štandardizované postupy vybraných požiarnych skúšok materiálov, ale aj stavebných konštrukcií, používané v podmienkach Slovenskej republiky sú podrobnejšie popísané v kapitole 3 tejto monografie.

Jednou z ďalších oblastí požiarneho inžinierstva, ktorým sa venuje táto monografia je oblasť matematického modelovania dynamiky vnútorných požiarov na báze aplikácie výpočtovej techniky. Základné princípy modelovania požiarov, požiarne modely a programové prostriedky používané na modelovanie správania vnútorných požiarov sú detailnejšie popísané v kapitole 4 tejto monografie.

Z hľadiska historického vývoja modelovania možno za počiatok modelovania dynamiky požiaru označiť modelovania na báze fyzikálnych modelov požiaru, t. j. testovanie parametrov požiaru v závislosti od meniaceho sa druhu paliva a scenára požiaru. Tieto typy požiarnych skúšok majú najčastejšie charakter laboratórnych (malorozmerových) alebo veľkorozmerových skúšok. Veľkorozmerové požiarne skúšky sa vykonávajú s cieľom reprodukcie daného požiarneho scenára na základe vytvorenia štruktúry alebo objektu s podobnými rozmermi ako je pôvodný objekt. Laboratórne skúšky pri replikácii požiarneho scenára využívajú štruktúry alebo telesá so zmenšenými rozmermi, ako i ďalšími premennými.

Fyzikálne modely možno považovať za predchodcov modelov matematických. Tie možno charakterizovať ako súbor matematických vzťahov, ktoré popisujú správanie fyzikálneho modelu (Beyler et al. 2008). Vznikli na základe poznatkov získaných z pozorovaní fyzikálnych modelov. Tieto matematické vzťahy majú charakter jednoduchých algebraických rovníc používaných na predikciu základných parametrov požiaru (napr. výpočet výšky plameňa), až po zložité parciálne diferenciálne rovnice používané na predikciu požiarneho javov v uzavretom priestore.

Od roku 1975 sa zvýšil význam počítačom podporovaného modelovania požiaru a aplikácie jeho výsledkov do riešenia problémov dynamiky požiaru. Hlavným cieľom modelovania je pritom uľahčenie matematického a vedeckého rozboru procesov dynamiky požiaru ako aj samotných parametrov požiaru.

Od počiatku budovania počítačových požiarneho modelov sa na rozvoji v tejto oblasti podieľali viaceré vládne, univerzitné a súkromné laboratória (laboratória amerického Štátneho úradu pre normalizáciu a technológie, americkej Komisie pre jadrovú reguláciu, Národného laboratória Sandia, Centra požiarneho inžinierstva Spojeného kráľovstva, Stavebnej a výskumnej asociácie Nového Zélandu (BRANZ), Harvardskej univerzity, Kalifornskej univerzity – Berkeley, Univerzity v Marylande, Worcesterškého Polytechnického Inštitútu, švédskej Univerzity Lund a Univerzity v Edinburgu). Ich snahy boli zamerané najmä na výskum v oblasti odvodzovania matematických vzťahov, tak aby tieto spoľahlivo reprezentovali skutočné správanie požiaru (Gorbett 2008).

Počítačové požiarne modely majú mnoho aplikácií vrátane návrhu a analýzy systémov protipožiarnej ochrany (napr. sprinklerových systémov, detekčných systémov), hodnotenie účinkov požiaru na ľudí a majetok, rekonštrukcie požiaru a hodnotenie rizika požiaru (Wood et al. 2008).

V súčasnosti sa využíva modelovanie pri navrhovaní a hodnotení protipožiarnej bezpečnosti stavieb a zariadení. Ich používanie je v súčasnosti v USA implementované v niekoľkých národných stavebných predpisoch a normách protipožiarnej bezpečnosti. Komisia jadrového dozoru Spojených štátov amerických pravidelne využíva počítačové modely požiaru pri navrhovaní uzavretých priestorov pre zaistenie maximálnej požiarnej bezpečnosti týchto priestorov (NRC 2006).

V súčasnosti nárast záujmu o využívanie počítačových modelov požiaru najmä v zahraničí zaznamenáva aj oblasť zisťovania príčin vzniku požiarov. Významne tomu napomohol aj fakt,

že Vláda Spojených štátov amerických vo svojej analýze požiaru Svetového obchodného centra využila požiarne modely FDS a CFAST pri hodnotení príčin šírenia požiaru a rozsahu škôd spôsobených požiarom. Analýzou tejto udalosti bol poverený Národný inštitút pre normalizáciu a technológie. Cieľom bolo určiť príčiny a priebeh požiaru na základe aplikácie počítačových požiarnych modelov (NIST 2005 a 2007).

Mnohé organizácie, ktoré vyvíjajú požiarne modely, ich naďalej rozvíjajú a to formou validačných a verifikačných štúdií.

Americký Národný úrad pre normalizáciu a technológie neustále posudzuje, validuje a verifikuje výsledky týchto modelov na základe porovnaní so skutočnými požiarными experimentami. To pomáha zabezpečiť správnosť a spoľahlivosť výsledkov týchto požiarnych modelov. Okrem toho existuje komunita užívateľov týchto požiarnych modelov, ktorá poskytuje tvorcom modelov konzistentnú spätnú väzbu ohľadom akýchkoľvek problémov s modelmi. Národný úrad pre normalizáciu a technológie tiež spolupracuje s nezávislými výskumníkmi, za účelom využitia ich údajov z experimentálnych testov pre účely verifikácie a validácie požiarnych modelov.

BRANZ (Nový Zéland), podobne ako Národný úrad pre normalizáciu a technológie, vykonáva rozsiahle experimenty, ktoré sa využívajú na neustálu validáciu matematických vzťahov, ktoré sú zahrnuté v modeli BRANZFIRE.

V podmienkach Slovenskej republiky má modelovanie správania požiaru zatiaľ len výskumný charakter, realizuje sa len na vybraných univerzitách a výskumných inštitúciách za účelom overenia možností jeho implementácie do riešenia viacerých problémov ochrany pred požiarimi. Zatiaľ absentuje jeho praktická aplikácia v bezpečnostnej praxi Slovenskej republiky.

## **2 ZÁKLADNÉ PRINCÍPY HORENIA A DYNAMIKY VNÚTORNÉHO POŽIARU**

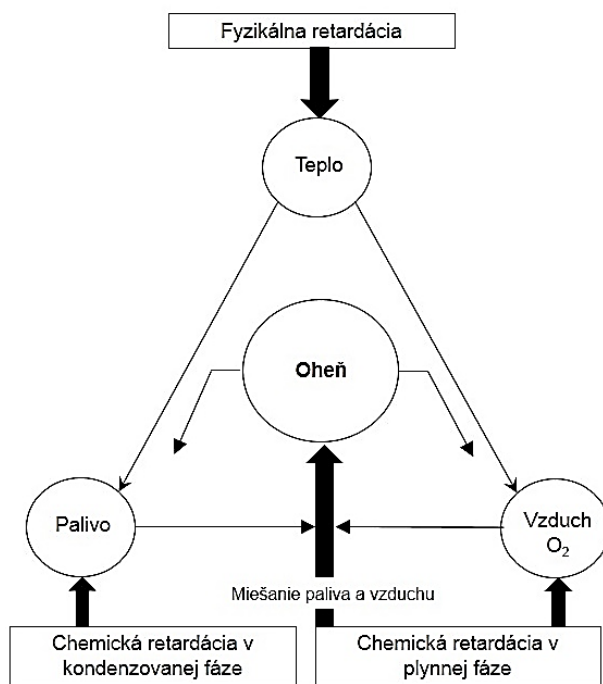
Neoddeliteľnou súčasťou požiarneho inžinierstva a zaistenia protipožiarnej bezpečnosti stavieb vôbec je poznanie procesu horenia a predpovedanie dynamiky rozvoja vnútorného požiaru. Poznatky z oblasti dynamiky požiaru sú dôležitými východiskami napríklad pri projektovaní stavieb, riadenej evakuácii, fyzikálnochemickom a matematickom opise interakcií oheň – materiály a oheň – ľudský organizmus, v procese zisťovania príčin vzniku požiaru pri hľadaní možných scenárov vzniku a rozvoja požiaru a určení najpravdepodobnejšej príčiny vzniku požiaru.

V tejto kapitole sú bližšie popísané základné princípy horenia a dynamiky požiaru potrebné pre pochopenie procesu horenia a rozvoja požiaru a pochopenie samotných procesov, ktorých výsledky ponúkajú prostredia určené na modelovania zmien parametrov požiaru.

### **2.1 Základy horenia**

Vplyvom tepla na horľavé materiály dochádza k väčšiemu počtu paralelných a postupných fyzikálnych a chemických dejov. Za prítomnosti oxidačného prostriedku sa za určitých hraničných podmienok začína predovšetkým proces tepelného horenia. Tepelným horením nazývame akýkoľvek relatívne rýchly reťazový autokatalytický reakčný mechanizmus spojený s uvoľnením veľkého množstva tepelnej energie, ktorý môže byť sprevádzaný výrazným svetelným efektom (Balog, Kvarčák 1999).

Pojem horenie môžeme definovať ako chemickú reakciu, ktorá je sprevádzaná uvoľňovaním tepla a vyžarovaním svetla. Pre samotný proces horenia je potrebná súčasná prítomnosť troch základných elementov horenia: horľavá látka (palivo), oxidačný prostriedok (vzduch, kyslík) a teplo (iniciačný zdroj). Nedostatok alebo absencia ktoréhokoľvek z nich, t . j. prerušenie trojuholníku horenia (obrázok 1) spôsobí zamedzenie horenia.



Obrázok 1 Schéma troch elementov horenia – trojuholník horenia (Balog, Kvarčák 1999)

V súvislosti s horením sa často používajú aj pojmy oheň a požiar.

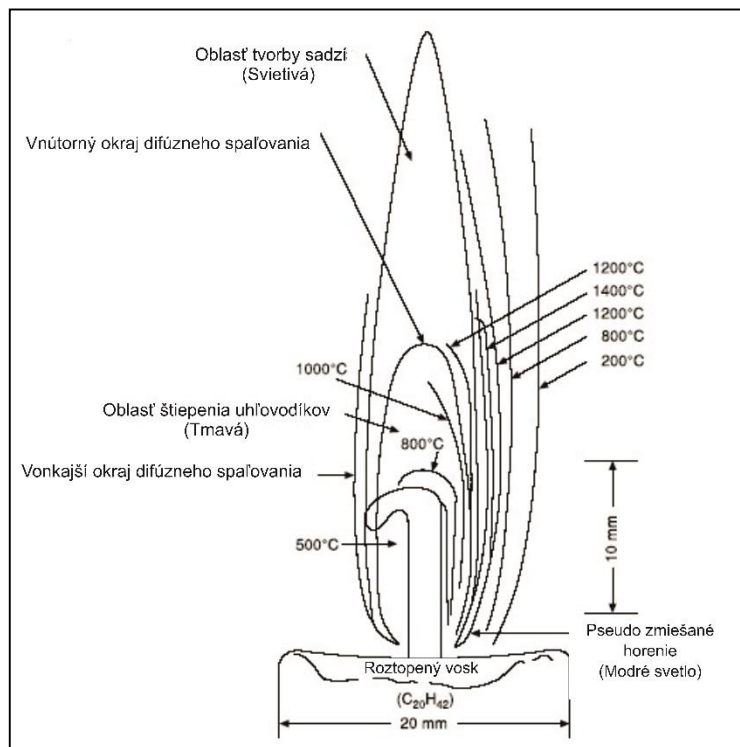
Oheň možno definovať ako horenie ohraničené priestorom a riadené človekom, na druhej strane požiar ako nekontrolované horenie a priestor jeho výskytu nie je vopred ohraničený.

Pre pochopenie podstaty procesov horenia je potrebné uplatňovať komplexný prístup s využitím zákonitostí z odboru hydromechaniky, prenosu tepla a látky a chemickej kinetiky.

Najjednoduchším prípadom horenia je vznik ustáleného laminárneho plameňa ukotveného na tuhom nosiči (knôť) pri horení vosku sviečky. Vonkajší zdroj zapálenia (malý plameň zápalky) zapáli knôť. Uvoľnená energia pri jeho horení spôsobí topenie vosku, ktorý vzlína knôtom a na jeho konci sa odparuje. Odparené horľavé plyny stúpajú do zóny s kyslíkom, kde sa oxidujú za vzniku plameňa. Vzniknutá tepelná energia sa prenáša radiáciou na vosk a spôsobuje jeho topenie a proces pokračuje ako ustálené horenie. Prebiehajúce procesy môžeme rozdeliť na prenos energie a prenos látky.

Pri prenose energie pri horení sviečky uplatňujú procesy radiácie, konvekcie aj kondukcie. Hlavným procesom je radiácia z plameňa, vyžarovanie energie z rozžeravených častíc uhlíka do okolia aj na tuhý vosk. Konvekciou je teplo odnášané zo zóny horenia. Radiáciou prenesená energia nepostačuje na vyparenie vosku, ale topí ho. Až kombinovaný proces radiácie, konvekcie a kondukcie na knôte poskytuje dostatočnú energiu na kontinuálne vyparovanie.

Predpokladom pre prenos látky pri horení sviečky je transformácia pevného paliva na kvapalné. Kvapalný vosk prúdi kapilárnymi silami knôtom a na jeho konci sa v dôsledku dostatočnej prijatej tepelnej energie vyparí. Materiálová rovnováha vyžaduje, aby sa odparený vosk nahradil, čo je hnacou silou pokračovania procesu. Plynné palivo je difúziou prenášané do zóny horenia, po zmiešaní s kyslíkom vzniká plameň. Vo vnútornej časti plameňa nie je dost' kyslíka, preto tu dochádza k nedokonalému spaľovaniu. Jeho produkty konvekčným tokom prúdia do hornej časti, kde zreagujú s kyslíkom za vzniku  $H_2O$  a  $CO_2$ . Prebiehajúce procesy ovplyvňujú teplotu plameňa (obrázok 2). Horenie laminárnym plameňom bez prítomnosti dymu je ovplyvňované rýchlosťou prúdenia paliva a vytvárania horľavého súboru. Kontinuálny proces horenia je ovplyvnený rozmermi a vlastnosťami knôtu a tuhého vosku.

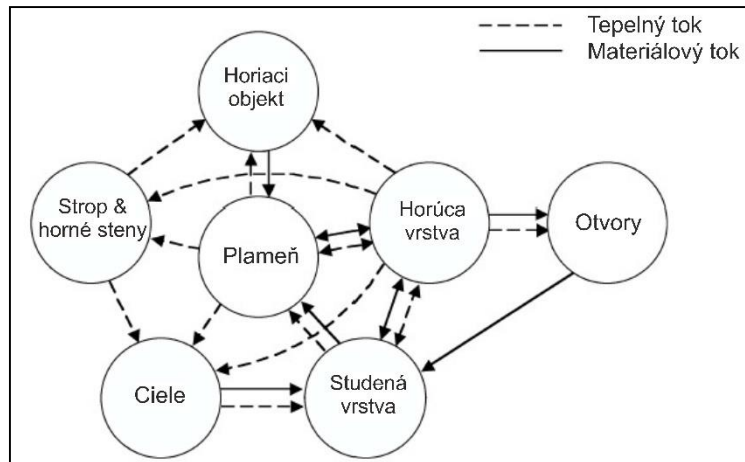


Obrázok 2 Plameň sviečky – popis a teploty (Karlsson, Quintiere 2000)

Horenie iných tuhých palív je zložitejším procesom. Skupenským zmenám často predchádza proces termického rozkladu, ktorý vyžaduje značnú energiu. Na iniciáciu horenia a vznik plameňa vplýva iniciačný zdroj, typ paliva a veľkosť jeho povrchu. Celý proces prebieha ako následné interakcie paliva, vzniknutých spalín a prostredia.

Poznatky z horenia materiálov rôzneho skupenstva a javov a dôsledkov prenosu tepla a látky je možné aplikovať aj na prípad vnútorného požiaru (obrázok 3).





Obrázok 3 Schéma prenosu tepla a látky a interakcií pri vnútornom požiari (Karlsson, Quintiere 2000)

Po zapálení nastáva následný rozvoj. Pri predpoklade plameňového horenia, ktoré vznikne pri vhodnej kombinácii iniciačného zdroja a vlastností paliva, spôsobí šírenie plameňa postupné zvyšovanie množstva uvoľneného tepla. Pri bezplameňovom horení je množstvo vzniknutého tepla nižšie, ale zvyšuje sa podiel produktov nedokonalého horenia. Pri popise tejto fázy je potrebné odhadnúť rýchlosť uvoľňovania energie a nárastu teploty, výťažok produktov horenia v spalinách a ich toxicitu.

Nad plameňom sa vytvára zóna horúcich spalín, ktoré v dôsledku vztlakovej sily a rozdielu hustôt prúdia nahor. Do tohto prúdu je nasávaný okolitý studený vzduch. Po dosiahnutí stropu sa horúce plyny rozširujú vírivými prúdmi a vytvoria hornú horúcu vrstvu, ktorá zasahuje aj bočné steny. Dôležité sú rýchlostné a teplotné profily tejto vrstvy, ako aj zväčšovanie jej hrúbky. Priestor je potom rozdelený na dve vrstvy. V hornej horúcej vrstve sa nachádzajú spaliny zmiešané so vzduchom a dolnú tvorí studený vzduch s pôvodnou teplotou. Vlastnosti uvedených vrstiev sa menia s časom, ale v rámci vrstvy sa pre zjednodušenie predpokladá homogenita.

Horúca vrstva zväčšuje svoj objem a hranica zadymenia klesá smerom nadol. Prísun ďalších horúcich spalín zvyšuje teplotu. Zvyšuje sa množstvo tepla preneseného radiáciou a konvekciou na strop, steny, podlahu, dolnú studenú vrstvu a palivo. Rýchlosť horenia sa zvyšuje a zahrievajú sa ďalšie palivá.

Ak má priestor otvorený otvor do susednej miestnosti alebo okolia a horúca vrstva dosiahne jeho horný okraj, dym začne unikať. Ak má otvor výplň z tabuľového skla, dym bude unikať po jeho prasknutí.

V priebehu rozvoja požiaru dochádza k zvýšeniu rýchlosti horenia a šíreniu plameňa z primárneho paliva na sekundárne palivá. Teplota hornej vrstvy sa zvyšuje a nastáva zvýšenie radiácie na ďalšie horľavé materiály. Dôsledkom je vznietenie alebo vzplanutie v celom priestore, veľmi rýchly a náhly prechod rozvíjajúceho sa požiaru do plne rozvinutého – flashover.

V plne rozvinutom požiaru plamene šľahajú z otvorov, proces prebieha do deficitu paliva alebo kyslíka. Pri deficite kyslíka, spôsobenom nedostatočnou ventiláciou, oheň pre nedostatok kyslíka uhasína. Znižuje sa rýchlosť uvoľňovania energie a teplota plynov. Teplota je často dostatočná pre pokračovanie pyrolýzy. Dochádza k akumulácii nezhorených plynov. Náhly prísun vzduchu spôsobí zmenšenie tepelného zaťaženia alebo zvýšenie rýchlosti uvoľňovania energie a neskôr môže nastať flashover. V najhoršom prípade sa produkty pyrolýzy po deficite kyslíka zmiešajú s vnikajúcim vzduchom a akýkoľvek zápalný zdroj spôsobí ich explozívne zhorenie. Uvoľnené teplo vyvolá expanziu plynov (zvýšenie tlaku) a rýchle vyšľahnutie horiacich plynov von – backdraft. Zriedkavo môže nastať explózia dymu, keď sa nezhorený plyn po úniku cez štrbiny zmieša so vzduchom, pričom na iniciáciu stačí iskra.

Tieto poznatky tvoria zároveň integrálnu súčasť problematiky dynamiky požiaru.

## **2.2 Dynamika vnútorného požiaru**

Dynamika požiaru zahŕňa štúdium základných chemických, fyzikálnych a termodynamických javov, ktoré sa podieľajú na vývoji, správaní, šírení a potláčaní požiaru. Popisuje rozsiahly komplex fyzikálnych a chemických dejov, ktoré charakterizujú požiar.

Základné koncepty z chémie a fyziky, spojené so základmi prenosu tepla a hmoty, sa používajú na pochopenie toho, ako štruktúry a komponenty reagujú v podmienkach požiaru, rovnako ako aj na pochopenie podmienok umožňujúcich vznik požiaru, jeho rozvoj a šírenie v rôznych prostrediach.

Výskum v tejto oblasti zahŕňa aj štúdium interakcií medzi požiarom a jeho prostredím vrátane aspektov požiarnej ventilácie, potlačenia, prenosu tepla z požiarov a prechodu z požiaru k explózií.

Vnútorný požiar možno vo všeobecnosti charakterizovať ako požiar, ktorý prebieha vo vnútri ohraničeného priestoru. Často sa v tejto súvislosti používa aj pojem požiar v uzavretom priestore.

Základom vysvetľovania procesov horenia pri požiaroch sú materiálové a energetické podmienky zahrnuté v už spomínanom trojuholníku horenia. Aplikáciou rozboru nevyhnutných podmienok pre vznik horenia sa dostávame k pojmom požiar riadený palivom a požiar riadený ventiláciou (odvetraním).

O požiaroch riadených palivom možno hovoriť po iniciácii (zapálení) a vo fáze rozvíjajúceho sa požiaru, rovnako ako pri uhasínaní. Je charakterizovaný dostatkom kyslíka a zmenou parametrov požiaru sú dominantne ovplyvňované charakteristikami paliva (horľavého materiálu).

V prípade požiaru riadeného ventiláciou (odvetraním), ktorý nastáva vo fáze plne rozvinutého požiaru, je nedostatok kyslíka na horenie produktov pyrolýzy, ktoré vznikajú následkom zvyšovania sa teploty v priestore. Na zmenu parametrov vnútorného požiaru má dominantný vplyv vzduch prúdiaci otvormi.

Zvyšovanie rýchlosti horenia a postupné zapalovanie ďalších materiálov má pri vnútorných požiaroch za následok zvyšovanie teploty v priestore. Dá sa vyjadriť rovnicami lineárnych alebo kvadratických funkcií. Za určitých podmienok prevažujú nelineárne formy rozvoja a šírenia sa požiaru, najbežnejšie sú flashover, backdraft a rollover.

Flashover nastáva pri prechode z rozvíjajúceho sa požiaru do plne rozvinutého. Jedná sa o náhle vznietenie (vzplanutie) všetkých horľavých materiálov v priestore v dôsledku zvýšenia teploty v uzavretom priestore (obrázok 4). Neprejavuje sa výraznými tlakovými účinkami.



Obrázok 4 Flashover – priestorové vzplanutie ([www.globalfireresearch.com](http://www.globalfireresearch.com))

Pri obmedzenej ventilácii vo fáze plne rozvinutého požiaru sa v priestore hromadia nezhořené plyny. Po náhlom prísune kyslíka zhorí vytvorená zmes extrémne vysokou rýchlosťou, čo sa prejaví expanziou horiacich plynov do okolia, ktorá spôsobuje deštrukciu materiálov

ohraničujúcich priestor. Tento zriedkavý jav sa teda prejavuje tlakovými účinkami (backdraft), (obrázok 5).



Obrázok 5 Backdraft – tlakový účinok požiaru ([www.firepatch.blog.cz](http://www.firepatch.blog.cz))

Rollover predstavuje rýchle šírenie plameňa pod stropom na veľké vzdialenosti v úzkych dlhých priestoroch (obrázok 6). Vyznačuje sa vysokou teplotou pod stropom a horením až do úplného vyhorenia v dôsledku styku s kyslíkom.

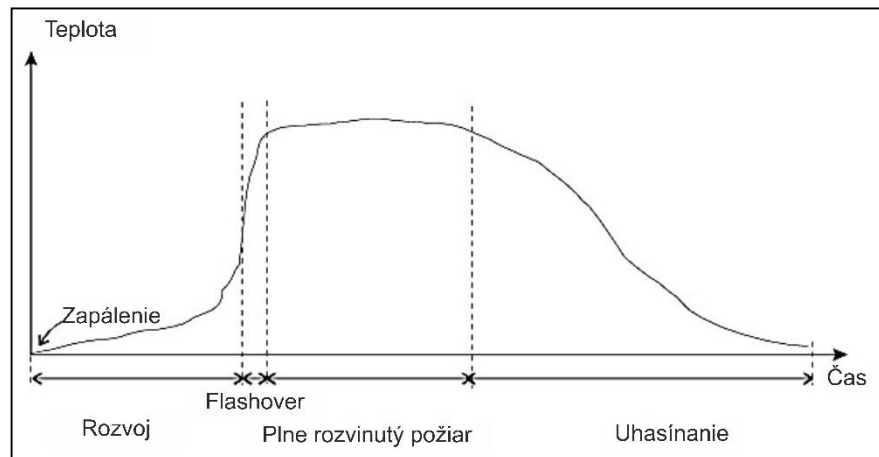


Obrázok 6 Rollover – rýchle šírenie plameňa pod stropom ([www.voyagerliveaction.com](http://www.voyagerliveaction.com))

Pre zjednodušený popis prenosových javov a ich vplyv na charakteristiky vnútorného požiaru je potrebné celý jeho priebeh rozdeliť na nadväzujúce fázy podľa vhodných kritérií. Najčastejšie sa využíva delenie na fázy podľa teplotno-časovej krivky, výmeny plynov cez otvory a vzniku flashover.

Pri popise požiaru podľa teplotno-časovej krivky rozoznávame nasledujúce základné fázy (obrázok 7):

1. zapálenie,
2. propagácia / rozvoj,
3. flashover,
4. plne rozvinutý požiar,
5. uhasínanie.



Obrázok 7 Teplotno-časová krivka vnútorného požiaru (Karlsson, Quintiere 2000)

Vo fáze 1 – zapálenie prebiehajú exotermické reakcie, dochádza k nárastu teploty nad teplotu okolia. Zapálenie vyvolávajú vonkajšie iniciačné zdroje alebo môže nastať spontánne. Proces prebieha ako plameňové alebo bezplameňové horenie.

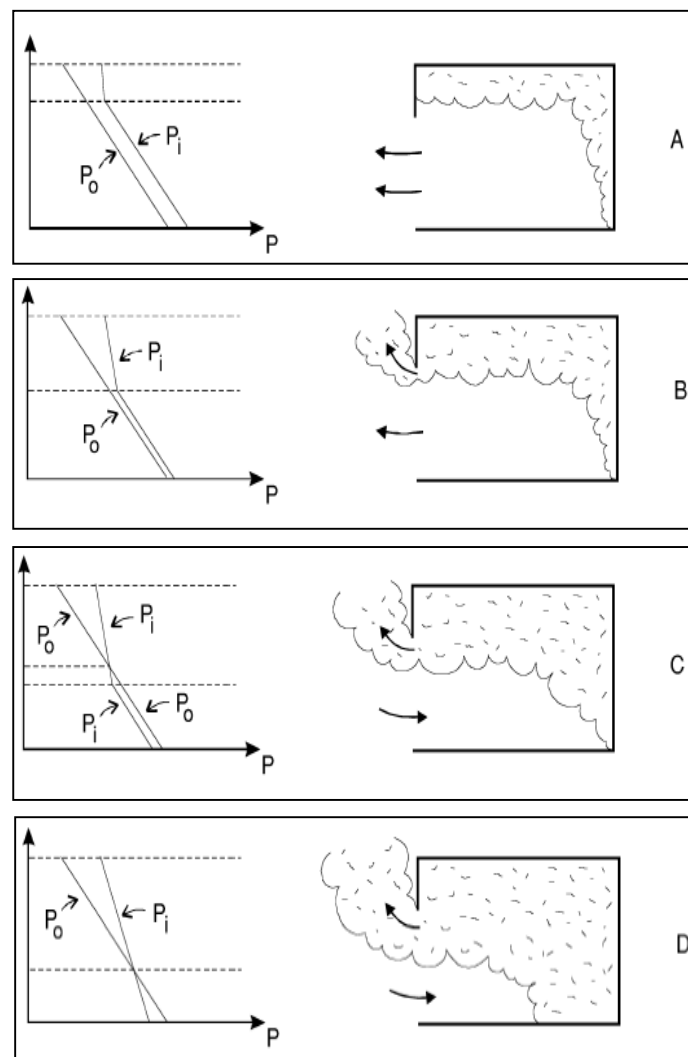
Fáza 2 – rozvoj môže prebiehať nízkou alebo vysokou rýchlosťou v závislosti od typu horenia, typu paliva, interakcie s okolím a prísunu kyslíka. Pri popise tejto fázy sa vychádza z rýchlosti uvoľnenia tepla, ktorá vplyva na rýchlosť nárastu teploty a vznik spalín. Pri rozvoji bezplameňového požiaru sa uvoľňuje veľké množstvo toxických plynov a rýchlosť uvoľňovania energie je nízka. Fáza má dlhé trvanie a požiar môže uhasnúť. Rozvoj plameňového požiaru je rýchly pri dostatku paliva a kyslíka, často je riadený palivom.

Kritériami fázy 3 – flashover je dosiahnutie teploty 500 – 600 °C, radiácia na podlahu 15-20 kW.m<sup>2</sup> a objavenie sa plameňov v otvoroch. Procesy prebiehajú rôznym mechanizmom v závislosti od vlastností a uloženia paliva, geometrie priestoru a podmienok v hornej horúcej vrstve.

Fáza 4 – plne rozvinutý požiar predstavuje uvoľnenie najväčšieho množstva energie. Často je obmedzená dostupnosť kyslíka a vtedy je riadený ventiláciou a dochádza k hromadeniu nezhořených plynov pod stropom a šľahaniu plameňov z otvorov. Teplota plynov dosahuje 700 – 1 200 °C.

Vo fáze 5 – uhasínanie sa v dôsledku spotrebovania paliva znižuje rýchlosť uvoľňovania energie, nastáva pokles teploty plynov a požiar riadený ventiláciou sa mení na požiar riadený palivom.

Pri klasifikácii fáz požiaru na základe výmeny cez otvory vychádzame zo zjednodušenia, že priestor s primárnym požiarom má jeden otvor v úrovni podlahy do okolia. Hybnou silou výmeny plynov medzi vnútorným a vonkajším priestorom je zmena prúdenia látky na základe zmien tlaku, pričom platí, že tlak na podlahe je vyšší (vyššia hmotnosť stĺpca vzduchu) a teplota dolnej (studenej) vrstvy plynov a vonkajšia je rovnaká. Požiar môžeme rozdeliť na fázy A, B, C, D (obrázok 8).



Obrázok 8 Fázy výmeny plynov pri vnútornom požiaru (Karlsson, Quintiere 2000)

Vo fáze A je vnútorný tlak vyšší ako vonkajší v dôsledku expanzie horúcich plynov. Ak sa otvor nachádza mimo stropu, studené plyny sú vytláčané. Pretože zmena tlaku je pozitívna vzhľadom na miestnosť, dnu plyny neprúdia. Fáza B trvá len niekoľko sekúnd (často sa zanedbáva). Vnútorný tlak je v celom priestore vyšší ako vonkajší. Dym dosiahol horný okraj otvoru a von

prúdia aj studené aj teplé plyny. Vo fáze C horúce plyny prúdia von hornou časťou otvoru a dnu prúdi ekvivalentné množstvo studených plynov dolnou časťou otvoru. Trvá to do úplného zadymenia alebo dosiahnutia flashover. Z toho vyplýva, že fázy A, B, C trvajú počas rozvoja požiaru (klasifikácia podľa teplotno-časovej krivky) resp. vo fáze pre-flashover (viď nasledujúci odsek) a predstavujú tzv. rozvrstvené plyny. Fáza D predstavuje dobre premiešané plyny, plne rozvinutý požiar, post-flashover. Celý priestor je zaplnený dymom, plyny majú rovnakú teplotu.

Z hľadiska vzniku flashover možno požiar rozdeliť na fázu pre-flashover a fázu post-flashover. V prvej z týchto fáz je potrebné priebeh požiaru posudzovať s dôrazom na bezpečnosť ľudí. Základom hodnotenia je rýchlosť uvoľňovania energie. Pre-flashover je fázou rozvoja požiaru, kedy je požiar riadený palivom. Vo fáze post-flashover je kladený dôraz na zaistenie stability stavby a bezpečnosti hasičov. Základom hodnotenia je teplotno-časová krivka. Je fázou plne rozvinutého požiaru, je riadený ventiláciou, ale môže sa zmeniť na riadený palivom.

### **2.2.1 Faktory ovplyvňujúce správanie požiaru**

Hlavné faktory vplývajúce na rozvoj vnútorného požiaru sú palivo a priestor. Ďalej je uvedené podrobnejšie delenie faktorov: iniciačný zdroj, palivo, geometria priestoru, ventilačné otvory, materiál ohraničujúci priestor.

- **Faktor iniciačného zdroja**

Základné delenie iniciačných zdrojov: iskra, horúci povrch, plameň (primárny požiar), chemická, elektrická, mechanická energia. Z charakteristík zdrojov je dôležitá teplota (cigareta 228 – 750 °C, acetylénový horák 2 700 – 3 200 °C) a doba pôsobenia. Vyššia energia zdroja znamená rýchlejší rozvoj požiaru a ovplyvňuje aj charakter požiaru. Iniciácia iskrou a cigaretou spôsobuje bezplameňové horenie, plamene sa objavujú až neskôr. Uvoľňuje sa malé teplo ale veľa toxických plynov. Po iniciácii plameňom (primárny požiar) nastáva plameňové horenie. Šírenie plameňa spôsobuje rýchlejší rozvoj požiaru.

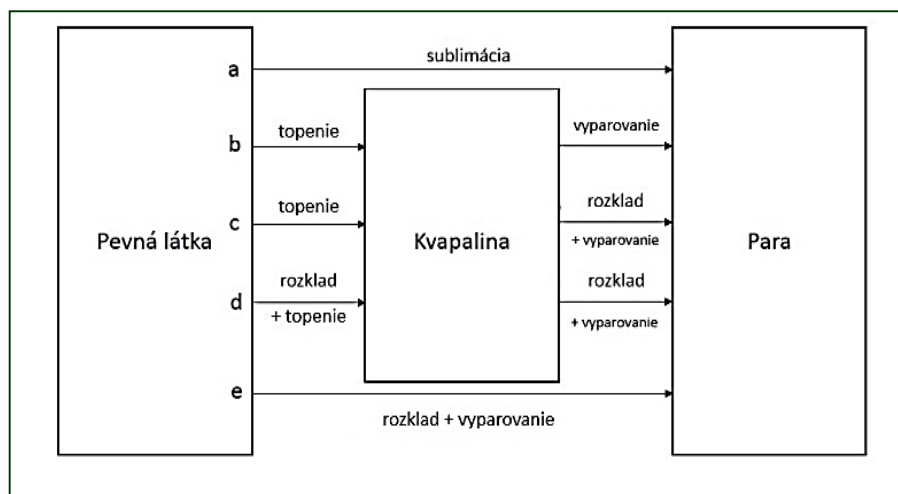
Na charakter rozvoja požiaru vplýva aj poloha zdroja. Ak sa zdroj nachádza pod palivom, dochádza k vzostupnému šíreniu plameňa, čo spôsobuje jeho rýchly, exponenciálny rozvoj. Umiestnenie zdroja nad palivom spôsobuje zostupné šírenie plameňa, ktoré je pomalé, plazivé.

- **Faktor paliva**

Plameňové horenie ovplyvňujú najmä chemické a fyzikálne charakteristiky paliva. Z chemických charakteristík sú dôležité chemické zloženie a štruktúra, prítomnosť a zloženie použitých

retardérov horenia. Z fyzikálnych charakteristík majú hlavný vplyv skupenstvo, teplota, tepelná vodivosť, tepelná kapacita, orientácia povrchu, hustota, hrúbka a geometria (rozmary).

Podmienkou plameňového horenia je vznik horľavých plynov a pár, na ktoré má vplyv skupenstvo a chemická štruktúra paliva. Pevné palivá sa na horľavé plyny transformujú rôznymi procesmi (obrázok 9), napr. sublimáciou (meténamín), topením a vyparovaním bez chemickej zmeny (nízkomolekulový parafín), topením, rozkladom, vyparovaním nízkomolekulových frakcií (vysokomolekulový parafín, termoplasty), rozkladom na taveninu, potom vyparovaním (polyuretány) alebo rozkladom priamo na prchavé produkty (celulóza).



Obrázok 9 Procesy splyňovania tuhého paliva (Drysdale 1999)

Pri vnútorných požiaroch je palivo väčšinou pevné, pri priemyselných stavbách často aj kvapalné. Charakter požiaru ovplyvňuje nielen skupenstvo, ale aj typ paliva. Nábytok z masívu má za následok pomalý rozvoj požiaru, ale dlho horí. V prípade poréznych materiálov a plastov s nízkou hustotou dochádza k rýchlejšiemu rozvoju požiaru, ale kratšiemu horeniu.

Poloha paliva vzhľadom na steny miestnosti ovplyvňuje teplotu a výšku plameňov. Ak sa palivo nedotýka stien, studený vzduch vstupuje do vzostupného prúdu spalín z každej strany. Ak je palivo umiestnené pri stene, studený vzduch pôsobí obmedzene, preto je vyššia teplota plameňov aj vyššia výška.

Orientácia povrchu paliva má vplyv na rýchlosť šírenia plameňov aj ich výšku. Vzostupne šírený požiar vo vertikálne orientovanom palive je rýchlejší než bočné šírenie medzi horizontálne orientovanými povrchmi paliva. Rýchlosť šírenia plameňa po filtračnom papieri sa v závislosti od polohy povrchu mení nasledovne:  $3,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  v horizontálnom smere ( $0^\circ$ ),  $6,3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pri  $22,5^\circ$ ;  $11,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pri  $45^\circ$ ;  $29,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pri  $75^\circ$ ;  $46,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  vo vertikálnom vzostupnom smere ( $90^\circ$ ).



- **Faktor geometrie priestoru**

Geometria priestoru, rozmery a pôdorys majú vplyv na teplotu, radiáciu horúcej vrstvy a zadymenie priestoru. Na teplotu vplyvajú absolútne hodnoty a pomer výšky priestoru k ploche. Horúca vrstva dymu (horná horúca vrstva) odráža teplo k horiacemu palivu, zvyšuje rýchlosť horenia, vplyv majú ich teploty a hrúbky. Spôsobuje to ohrievanie ďalších horľavých materiálov. Výška priestoru má vplyv na zadymenie. Množstvo vzduchu nasávaného do prúdu spalín nad ohniskom požiaru závisí od vzdialenosti medzi povrchom paliva a hranicou horúcej vrstvy. Veľké množstvo nasávaného vzduchu má za následok, že teplota plynov je relatívne nízka, ale proces zadymenia je pri vysokom strope ale aj pri menšej ploche relatívne rýchly. Pri posudzovaní vplyvu na spätný tepelný tok sa do úvahy berie to, že pri nízkom strope je prenos tepla do paliva väčší, plamene dosiahnu strop a šíria sa horizontálne. To zvyšuje spätný tepelný tok a spôsobuje rýchly rozvoj požiaru. Ak je vysoký strop a veľká plocha, plamene nedosiahnu strop a spätný tepelný tok na palivo je mierny. Rozvoj požiaru súvisí s priamou radiáciou z plameňa do okolia. Ak je nízky strop a veľká plocha, spätný tepelný tok z horúcej vrstvy a plameňov pod stropom je veľmi intenzívny blízko ohniska požiaru.

Veľký vplyv na šírenie požiaru má geometria aj vo veľkých priestoroch, kde sa horúce plyny zhromažďujú pod stropom, a radiáciou dochádza k ohrievaniu horľavých látok a následne extrémne rýchlemu šíreniu požiaru cez široký priestor.

- **Faktor ventilačných otvorov**

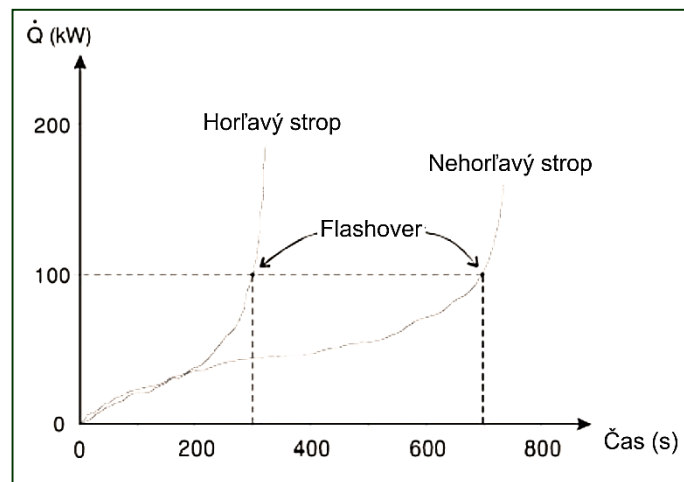
Požiar musí mať prístup kyslíka pre svoj rozvoj. V prípade priestorov stredného objemu, ktoré sú uzatvorené, alebo sú s okolím spojené len malými štrbinami, čoskoro nastáva nedostatok kyslíka, požiar sám uhasína alebo sa šíri veľmi nízkou rýchlosťou. Ak má priestor ventilačné otvory, dôležité sú ich veľkosť, tvar a poloha.

Kým nie je požiar riadený ventiláciou, otvory slúžia na odvod horúcich plynov pri vhodnej výške a polohe, čo znižuje spätný tepelný tok na palivo a rozvoj požiaru je pomalší. Keď je požiar riadený ventiláciou – najdôležitejší je vplyv otvorov na rýchlosť šírenia požiaru. Rýchlosť horenia závisí na ventilačnom faktore  $A_o \cdot \sqrt{H_o}$  (plocha a výška otvoru). Zvýšenie ventilačného faktoru spôsobuje ekvivalentné zvýšenie rýchlosti horenia (až kým horenie nezačne byť riadené palivom).

- **Faktor ohraničujúcich materiálov**

Na rozvoj a charakteristiky požiaru má vplyv horľavosť a termické vlastnosti materiálu ohraničujúcich povrchov. Horľavý strop a steny spôsobujú rýchly nárast požiaru. Ak je strop

horľavý, nastáva rýchle šírenie plameňa a horúcich plynov. Ak je nehorľavý strop, plameň sa šíri horizontálne, pomalšie. Materiály s preto zahrievajú pomalšie a flashover vzniká v neskoršom čase (obrázok 10).



Obrázok 10 Flashover pri horľavom a nehorľavom strope (Karlsson, Quintiere 2000)

Materiál povrchov miestnosti má vplyv na teplotu horúcich plynov a spätný tepelný tok na palivo a ostatné povrchy. Charakteristiky riadiace spätný tepelný tok sú konduktivita ( $k$ ), hustota ( $\rho$ ), tepelná kapacita ( $c$ ). Ich súčin sa nazýva tepelná inercia (zotrvačnosť)  $k \cdot \rho \cdot c$ . Izolačné materiály majú nízku tepelnú inerciu, viac tepla zostáva v priestore. Naproti tomu betón má vysokú tepelnú inerciu, odvedie viac tepla do konštrukcie, prípadne zníži teplotu plynov v priestore.

### 2.2.2 Rýchlosť uvoľňovania tepelnej energie pri požari

Rýchlosť uvoľňovania energie pri požari vplyva na vzostupný prúd horúcich spalín nad ohniskom požiaru, teplotu horúcich plynov, rýchlosť znižovania hranice hornej horúcej vrstvy.

Pri odhade rýchlosti uvoľňovania tepla je východiskom rýchlosť horenia. Rýchlosť horenia býva často vyjadrená ako hmotnostná rýchlosť odhorievania  $\dot{m}$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ktorá sa využíva hlavne pri horení tuhých látok, alebo ako plošná rýchlosť odhorievania  $\dot{m}''$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ktorá sa využíva pri popise horenia pevných látok aj horľavých kvapalín. Treba poznamenať, že rýchlosť horenia a rýchlosť úbytku hmotnosti paliva nie je synonymom pri nedokonalom horení.

Rýchlosť uvoľňovania energie  $\dot{Q}$  alebo tepla (HRR) je teplo uvoľnené za jednotku času ( $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1} = \text{kW}$ ).

Teplo potrebné na splynutie jednotkovej hmotnosti paliva sa nazýva teplo splyňovania  $\Delta H_g$  ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Spaľovacie teplo je mierou uvoľnenia energie pri spálení jednotkovej hmotnosti materiálu ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Môže byť vyjadrené ako celkové-úplné  $\Delta H_c$ , alebo ako efektívne  $\Delta H_{ef}$ , ktoré je výhodnejšie pre popis požiaru. Pomer medzi efektívnym spaľovacím teplom a celkovým (úplným) uvoľneným teplom sa nazýva účinnosť spaľovania  $\chi$  (-).

Požiarne scenár je vývoj požiaru charakterizovaný v zmysle uvoľňovania energie v závislosti na čase. Pri jeho výbere sa využívajú dva prístupy. V prípade, že sú informácie o znalosti množstva a type paliva na požiarisku, používa sa HRR získané z predchádzajúcich meraní. V prípade, ak chýbajú detaily, využíva sa tzv. inžinierske riešenie.

Hlavné faktory ovplyvňujúce HRR pri vnútorných požiaroch sú palivo (typ, množstvo, orientácia) a prostredie. Minimalizovaný vplyv prostredia sa uplatňuje pri prirodzenom (voľnom) rozvoji požiaru, kedy dochádza bez obmedzenia k úniku spalín a nedochádza k spätnému radiačnému toku z hornej horúcej vrstvy.

HRR nie je konštantou, mení sa s časom v závislosti od tepla splyňovania paliva a je priamo úmerná rýchlosti odhorievania. Rýchlosti horenia sa získavajú experimentálne. Teplo splyňovania sa ťažko stanovuje pre pevné palivá, pre ktoré nie je konštantné. Pre kvapalné palivá je teplo splyňovania totožné s teplom vyparovania.

Pri prostredí posudzujeme dva hlavné vplyvy na HRR. V prvom prípade horúce plyny v hornej vrstve ohrievajú strop a steny a následne povrchy a plyny vyžarujú energiu na povrch paliva, čím zvyšujú rýchlosť horenia. Ak sa v priestore nachádzajú malé otvory, môže byť znížená dostupnosť  $\text{O}_2$  na horenie. Dochádza k zhoreniu menšieho množstva paliva, v priestore sa kumuluje viac nezhořených plynov. To má za následok nižšiu HRR. Všeobecne platí, že prenos tepla zvyšuje plošnú rýchlosť odhorievania a nedostatok kyslíka pri podlahe znižuje  $\dot{m}$ .

Prvá z metód, ktoré sa používajú na odhad HRR pri voľnom horení, využíva vzťah medzi kyslíkom spotrebovaným na oxidáciu a uvoľneným teplom. Vzťah bol odvodený po experimentálnom stanovení HRR pre viaceré požiarne scenáre (napr. nádrže horľavých kvapalín, polyméry) za podmienok neobmedzeného prístupu kyslíka a kontinuálneho odvodu horúcich plynov. Z výsledkov kalorimetrického stanovenia vyplynulo, že pre rôzne prípady došlo ku konštantnému uvoľneniu energie  $13\ 100\ \text{kJ}$  na  $1\ \text{kg}$  spotrebovaného kyslíka. Rýchlosť uvoľneného tepla sa dá vyjadriť podľa vzťahu [1].

$$\dot{Q} = 13\ 100\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \cdot \text{spotrebovaný kyslík}\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1} \quad (\text{kg}\cdot\text{s}^{-1} = \text{kW}) \quad [1]$$

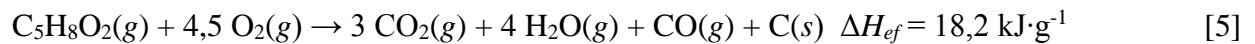
Pri druhej metóde sa využíva rýchlosť hmotnostná rýchlosť horenia ( $\dot{m}$ ). HRR potom odhadujeme z efektívneho spaľovacieho tepla ( $\Delta H_{ef}$ ) [2].

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_{ef} \quad [2]$$

HRR možno vypočítať z priemernej rýchlosti plošného odhorievania stanovenej experimentálne pre prirodzený požiar rôznych materiálov a horizontálnej horiacej plochy paliva ( $A_f$ ) a efektívneho spaľovacieho tepla ( $\Delta H_{ef}$ ) [3].

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_{ef} \quad [3]$$

Pre pochopenie rozdielu medzi  $\Delta H_{ef}$  a  $\Delta H_c$  (spaľovacie teplo) je možné uviesť príklad horenia PMMA. Pre dokonalé horenie PMMA platí [4]. Pre špecifický požiar PMMA platí [5].



Problémom pri uplatnení uvedených výpočtov je to, že pri vnútorných požiaroch nepoznáme stechiometriu horenia a hodnoty  $\Delta H_{ef}$  nie sú tabelované. Pre dobre odvetraný vnútorný požiar môžeme využiť odhady účinnosti spaľovania ( $\chi$ ) pre bežné palivá [6].

$$\chi = \frac{\Delta H_{ef}}{\Delta H_c} \quad [6]$$

Takmer 100 % - ná účinnosť spaľovania je pri horení bez vzniku sadzí (alkoholy, metán), oleje a horľaviny s čadivým plameňom majú účinnosť spaľovania 60-70 %. Na  $\chi$  má veľký vplyv dostupnosť kyslíka, pre malé priestory sa účinnosť výrazne znižuje so znižovaním koncentrácie kyslíka. HRR potom vypočítame podľa [7].

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad [7]$$

Pri odhade HRR pri požiaroch nádrží kvapalín vychádzame z poznatkov, že kvapalné horľaviny predstavujú veľké riziko, pretože sú často prechavé pri bežných teplotách a ľahko tvoria horľavé a výbušné zmesi s oxidačným prostriedkom. Ale niektoré majú vysoké teploty vznietenie a vyžadujú lokalizované zahrievanie, no majú vysokú rýchlosť šírenia plameňa po povrchu. Pri prirodzenom požiaru horľavých kvapalín rýchlosť odhorievania závisí od priemeru nádrže. Z experimentov posudzujúcich závislosť rýchlosti odhorievania na priemere boli urobené závery, že pre priemer nádrže nad 0,2 m sa rýchlosť odhorievania zvyšuje s priemerom do určitej hodnoty, potom je konštantná  $\dot{m}''_{\infty}$ . Pre horenie alkoholov je priemer nádrže zanedbateľný. Rýchlosť odhorievania ovplyvňujú aj konštanty  $k$ ,  $\beta$ , charakterizujúce palivo (sú funkciou radiačného toku

energie z plameňa na povrch paliva). Boli stanovené a tabelované pre kvapaliny aj termoplasty. Z pokusov bola odvodená rovnica rýchlosti plošného odhorievania [8] a následne rovnica pre HRR pri požiaroch nádrží horľavých kvapalín [9].

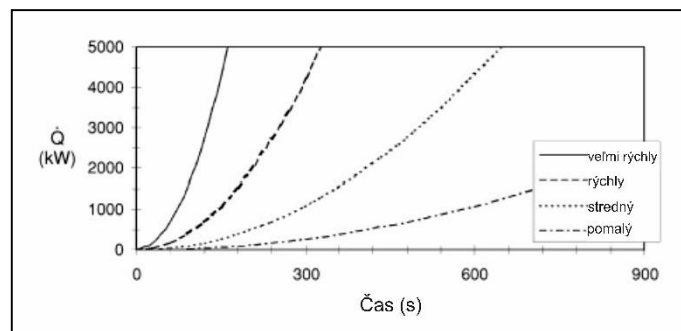
$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta \cdot D}) \quad [8]$$

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta \cdot D}) \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad [9]$$

Podľa doterajších predpokladov materiály horia takmer konštantnou rýchlosťou. V skutočnosti pri mnohých materiáloch nastáva zmena rýchlosti horenia v čase, po zapálení rýchlosť vzrastá do maxima, potom sa znižuje do vyhorenia (v zmysle krivky iniciácia, rozvoj, uhasínanie). Rôzne iniciátory ovplyvňujú čas do zapálenia a HRR v iniciačnej fáze, ale maximum HRR a čas horenia je podobný. Z experimentov vyplýva, že pri reálnych požiaroch je HRR v iniciačnej fáze takmer vždy urýchlená [10].

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad [10]$$

V uvedenom vzťahu  $\alpha$  predstavuje faktor rastu ( $\text{kW} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $t$  predstavuje čas (s). Ak čas potrebný na začatie uvoľňovania signifikantného tepla je  $t_0$ , na základe tabelovaných údajov  $\alpha$ ,  $t_0$  pre rôzne materiály a výrobky je možné rozvoj požiaru klasifikovať ako veľmi rýchly ( $\alpha = 0,19$ ), rýchly ( $\alpha = 0,047$ ), stredný ( $\alpha = 0,012$ ) a pomalý ( $\alpha = 0,003$ ) (obrázok 11). Uvedenú klasifikáciu možno popísať aj podľa hodnoty času dosiahnutia hodnoty HRR 1055 kW (75 s, 150 s, 300 s, 600 s).



Obrázok 11 Klasifikácia rozvoja požiaru podľa HRR (Drysdale 1999)

### 2.2.3 Dynamika plameňa a prúdu spalín

Nad plameňom horiaceho paliva sa uvoľňujú horúce plyny, ktoré stúpajú nahor v dôsledku menšej hustoty a vztlaku. Do tohto prúdu je nasávaný okolitý studený vzduch. Dôležitými otázkami sú teplota a výška plameňov, teplota, hmotnostný tok a rýchlosť v prúde spalín, rozšírenie a pokles zadymenia.

Osovymetrický plameň a prúd spalín vzniká, ak má difúzny plameň nad horiacim palivom vertikálnu os symetrie. Vzduch je nasávaný horizontálne zo všetkých smerov.

Vzostupný prúd spalín je tvorený plynmi nad plameňom, ktoré stúpajú nahor. Polomer vzostupného prúdu spalín v určitej výške nad palivom sa označuje  $b$  (m). Hmotnostný tok spalín predstavuje celkovú hmotu prenesenú v určitej výške nad palivom za jednotku času  $\dot{m}_p$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Teplota prúdu spalín sa určuje v určitej výške nad palivom, najvyššia je v osi symetrie (dolný index 0),  $T_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ , K). Rýchlosť vzostupného prúdu je rýchlosťou stúpajúcich plynov, najvyššia je v danej výške v osi symetrie  $u_0$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

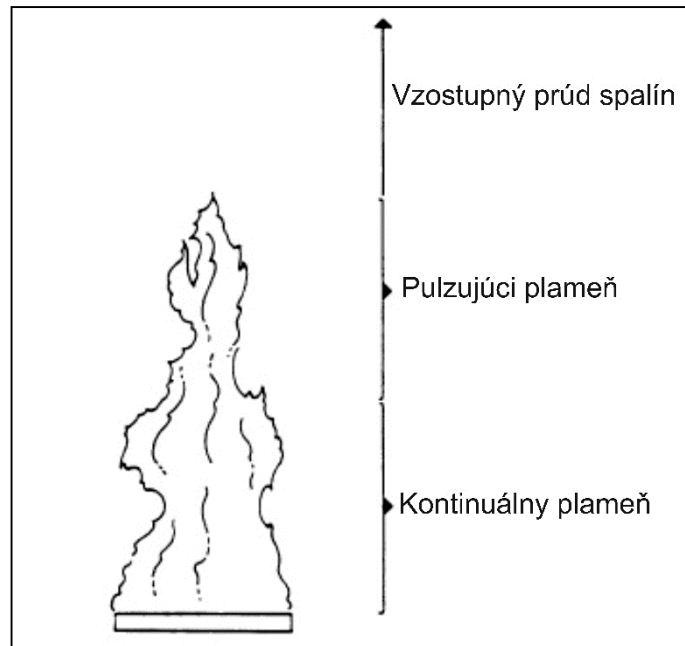
Pred vznikom plameňa sa horľavé plyny a kyslík zmiešajú procesom molekulovej difúzie. Rýchlosť stúpania vzniknutých spalín je riadená vztlakovou silou, ak rýchlosť vzniku horľavých plynov nie je výnimočne vysoká (roztrhnutie potrubia). Veľké plamene sú turbulentné, vzniká nestabilita medzi horúcim plameňom a studeným vzduchom, čo má za následok premenlivú výšku a obrys plameňa.

Stredná výška plameňa  $L_f$  (m) je priemerná hodnota výšky svietivého plameňa v čase. Z experimentov z horenia jednoduchých plynov (metán, propán) vyplynula súvislosť s plochou horenia ( $D$ ) a HRR, ktorá je vyjadrená v rovnici strednej výšky plameňa [11]. Pre reálne požiare musíme uvažovať o geometrii paliva (horizontálne a vertikálne rozloženie), o vplyve stien, stropu, otvorov.

$$L_f = 0,235 \cdot \sqrt[5]{\dot{Q}^2} - 1,02 \cdot D \quad [11]$$

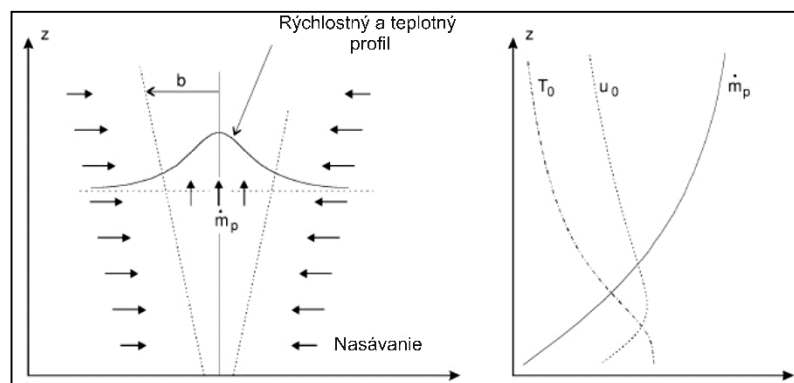
### **Charakteristiky turbulentného prúdu spalín**

Osovymetrický plameň a prúd spalín možno rozdeliť na tri zóny (obrázok 12), ktorými sú kontinuálny plameň, pulzujúci plameň, vzostupný prúd spalín.



Obrázok 12 Zóny plameňa a vzostupného prúdu spalín (Drysdale 1999)

Rýchlosť vzostupného prúdu je najvyššia v osovom strede,  $u_0$  sa mení s výškou (vplyv vzduchu). Aj teplota vzostupného prúdu je najvyššia v osovom strede, pričom  $T_0$  je takmer konštantná v zóne 1 (stredná teplota plameňa), znižuje sa s nasávaným vzduchom ( $\Delta T = T_0 - T_\infty$ ). Hmotnostný tok spalín  $\dot{m}_p$  sa zvyšuje s výškou v dôsledku vplyvu vzduchu (obrázok 13). Rýchlosť nasávania vzduchu do vzostupného prúdu spalín  $v = \alpha \cdot u$ , kde  $\alpha$  je koeficient nasávania. Ak je nasávanie vzduchu proporcionálne, potom  $\alpha = 0,15$ . Zmeny hustoty plynov vo vzostupnom prúde sú malé a platí  $\rho_\infty = \rho$ . Mimo prúdu spalín  $u = 0$  a  $T = T_\infty$ . Pre reálne požiare dochádza k strate 20-40 % tepelnej energie radiáciou.



Obrázok 13 Charakteristiky vzostupného prúdu spalín (Drysdale 1999)

Charakteristiky turbulentného prúdu spalín (hmotnostný tok spalín, zmena teploty plynov) vzhľadom na výšku  $z$  sa vypočítajú podľa [12, 13]. Z rovníc vyplýva, že hmotnostný tok spalín sa

zvyšuje so zvyšovaním HRR a výšky, zmena teploty sa s výškou znižuje ( $g$  je tiažové zrýchlenie a  $c_p$  je izbarická tepelná kapacita vzduchu).

$$\dot{m}_p = 0,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty} \cdot \dot{Q} \cdot z^5} \quad [12]$$

$$\Delta T = 5 \cdot \sqrt[3]{\frac{T_\infty \cdot \dot{Q}^2}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2 \cdot z^5}} \quad [13]$$

### Rovnice odvodené na základe experimentov

Zukoski (1995) odvodil rovnice [14] platné pre ideálny prúd spalín a preddefinované podmienky okolia. Výpočty boli overené pre tri rôzne HRR, výšky plameňa a množstvá paliva.

$$\dot{m}_p = 0,071 \cdot \sqrt[3]{\dot{Q} \cdot z^5} \quad [14]$$

Heskestad (1991) vychádzal pri odvodení rovníc [15, 16, 17, 18] z pomyselného vzniku plameňa v bode  $z_0$  pod úrovňou podlahy, pričom  $\dot{Q}$  je celkové teplo,  $\dot{Q}_c$  teplo prenášané konvekciou. Platí  $\dot{Q}_c = 0,6 - 0,8\dot{Q}$ .

$$L_f = 0,235 \cdot \sqrt[5]{\dot{Q}^2} - 1,02 \cdot D \quad [15]$$

$$\Delta T_0 = 25 \cdot \sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2}{(z-z_0)^5}} \quad [16]$$

$$\dot{m}_p = 0,071 \cdot \sqrt[3]{\dot{Q}_c \cdot (z - z_0)^5} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_c \quad z > L \quad [17]$$

$$\dot{m}_p = 0,0056 \cdot \dot{Q}_c \frac{z}{L} \quad \text{v plameni } z < L \quad [18]$$

McCaffrey (1979) rozdelil výpočty na zónu kontinuálneho plameňa, pulzujúceho plameňa a vzostupného prúdu spalín [19].

$$\Delta T_0 = \left( \frac{\kappa}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^2 \cdot \left( \frac{z}{\sqrt[5]{\dot{Q}^2}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_\infty \quad [19]$$

V tabuľke 1 je uvedené rozdelenie hodnôt turbulентného prúdu spalín podľa McCaffreyho.



Tabuľka 1 Rozdelenie hodnôt turbulentného prúdu spalín podľa McCafreyho

| Zóna               | $\frac{z}{\sqrt[5]{\dot{Q}^2}}$ (m·kW <sup>-2/5</sup> ) | $\eta$ | $\kappa$                                     |
|--------------------|---|--------|--|
| kontinuálny plameň | < 0,08  | 1/2    | 6,8 (m <sup>1/2</sup> ·s <sup>-1</sup> )     |
| pulzujúci plameň   | 0,08-0,2  | 0      | 1,9 (m·kW <sup>-1/5</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
| vzostupný prúd     | > 0,2   | -1/3   | 1,1 (m·kW <sup>-1/3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |

V uvedených prípadoch bola stredná výška plameňov väčšia než priemer ohniska. Thomas (1963) odvodil rovnice [20] pre opačný prípad, platné pre  $L_f/D < 1$ , ale aj pre nekruhové ohniská, ak poznáme ich obvod  $P$ ,  $P = \pi \cdot D$ .

$$\dot{m}_p = 0,188 \cdot P \cdot \sqrt{z^3} = 0,59 \cdot D \cdot \sqrt{z^3} \quad [20]$$

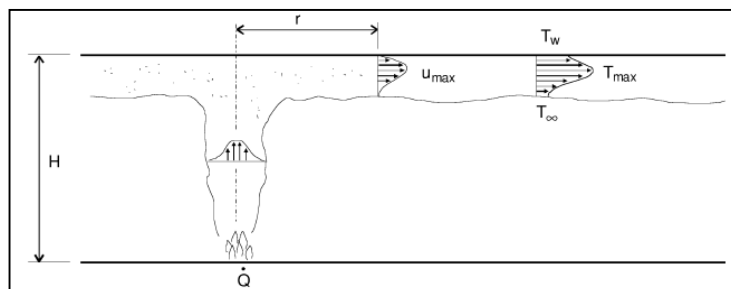
Doteraz neboli uvažované interakcie stien s prúdom spalín. V nasledujúcich rovniciach je uplatnený vplyv steny [21] alebo rohu [22].

$$\dot{m}_{p,stená} = 0,045 \cdot \sqrt[3]{\dot{Q} \cdot z^5} \quad [21]$$

$$\dot{m}_{p,roh} = 0,028 \cdot \sqrt[3]{\dot{Q} \cdot z^5} \quad [22]$$

### Prúd spalín pod stropom

Ak vzostupný prúd spalín dosiahne strop, horúce plyny sa šíria horizontálnym prúdom pod stropom (obrázok 14). Po dosiahnutí stropu sa vypočíta vzdialenosť rozšírenia prúdu spalín pozdĺž stropu  $r$ . V prípade idealizovaného prúdu spalín pod stropom s veľkou plochou dochádza k neobmedzenému šíreniu. Na začiatku je hrúbka horúcej vrstvy pod stropom 5-12 % z výšky miestnosti, maximálna rýchlosť a maximálna teplota sú relatívne blízko stropu, asi 1 % z výšky miestnosti. Teplotný profil je dolu ohraničený teplotou prostredia  $T_\infty$ , na hornej teplotou stropu  $T_w$ .



Obrázok 14 Rozšírenie prúdu spalín pod stropom (Drysdale 1999)

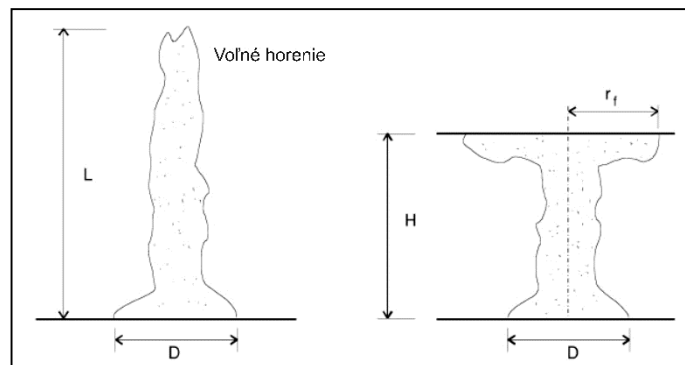
Pre HRR 500 kW – 100 MW a  $H$  4,6 – 15,5 m boli odvodené vzťahy [23, 24].

$$r/H < 0,18 \rightarrow T_{max} - T_{\infty} = 16,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2}{H^5}} \quad [23]$$

$$r/H > 0,18 \rightarrow T_{max} - T_{\infty} = 5,38 \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2}{r^2}}}{H} \quad [24]$$

Ak plamene dosiahnu strop, nezhořené plyny sa rozšíria radiálne, nasávajú vzduch a pod stropom vzniká kruhový plameň (obrázok 15). Radiálne rozšírenie plameňa  $r_f$  pre HRR 93 – 760 kW sa vypočíta podľa vzťahu [25].

$$r_f = 0,95 \cdot (L - H) \quad [25]$$



Obr. 15 Rozšírenie plameňa pod stropom (Drysdale 1999)

#### 2.2.4 Tlak a výmena plynov pri požari

Plyny v miestnosti, v ktorej prebieha požiar, sú charakterizované ako rozvrstvené plyny, keď ich možno rozdeliť na hornú horúcu a spodnú studenú vrstvu (má vlastnosti okolia), alebo ako dobre premiešané plyny, ak má plyn vo vnútri miestnosti rovnakú teplotu v celom objeme.

Ak má miestnosť otvory do susedných priestorov, nastáva prúdenie plynov z miesta vyššieho tlaku do miesta nižšieho tlaku. Výmena plynov cez otvory nie je ideálna (pohyb bez trenia, nestlačiteľnosť, izotermickosť). Odpor voči toku je vyjadrený efektívnym prechádzaním cez časť otvorov, čo zohľadňuje koeficient prietoku  $C_d \sim 0,7$ .

Tlakové rozdiely sú dané rozdielom hydrodynamického tlaku (statický tlak v otvore v danej výške, keď objem plynu prechádza zo stavu pokoja do pohybu s rýchlosťou  $v$ ) a rozdielom hydrostatického tlaku (spôsobený tiažou stĺpca plynu alebo kvapaliny). V určitej výške je tlakový rozdiel studenej a horúcej vrstvy plynu nulový – vzniká neutrálna rovina.

Poznáme dve kategórie tlakových rozdielov:

- spôsobené požiarom,
- prirodzené.

Typy  $\Delta p$  spôsobené požiarom:

- dôsledok termickej expanzie v uzavretom priestore, cez štrbiny sa vyrovnáva, väčšinou sa zanedbáva (uvažujeme pri scenároch požiaru uzavretých miestností – lodná strojovňa),
- dôsledok vztlaku alebo rozdielu hustôt horúcich a studených plynov (rozširovanie dymu).

Typy prirodzených  $\Delta p$ :

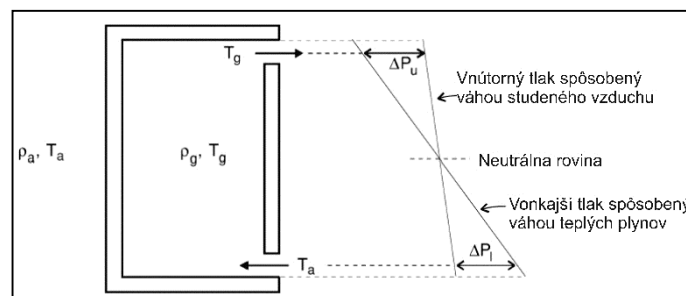
- rozdiel hustôt vo vnútri a von v dôsledku rozličnej teploty (podobne ako v predchádzajúcom prípade),
- vplyv veterného zaťaženia stavby (aerodynamický koeficient),
- vplyv mechanickej ventilácie (odstránenie dymu), prúdenie je väčšinou zanedbateľné vzhľadom na prietok vyvolaný vztlakom.

### Charakteristiky tlaku pre vnútorné požiare

Hydrostatický tlak vzduchu sa zvyšuje s hmotnosťou jeho stĺpca, môže byť vyjadrený ako tlakový rozdiel vo vzťahu k atmosférickému tlaku  $p_0$ . Rozdiel hydrostatického tlaku je daný súčinom výšky stĺpca plynu, jeho hustoty a gravitačného zrýchlenia [26].

$$\Delta p = h \cdot \rho \cdot g \quad [26]$$

Uvažujeme o miestnosti s dvoma otvormi v rôznych výškach nad sebou a teplota plynov vo vnútri  $T_g$  je konštantná a platí  $T_g > T_a$ . Pre horný otvor  $\Delta p_u > 0$ , preto horúce plyny unikajú von, pre dolný otvor:  $\Delta p_l < 0$ , vonkajší studený vzduch vniká dnu (komínový efekt). Neutrálna rovina leží vo výške danej priesečníkom tlakových profilov (nulový tlakový rozdiel), výšku ovplyvňuje rozdiel teplôt a geometria otvorov (obrázok 16).

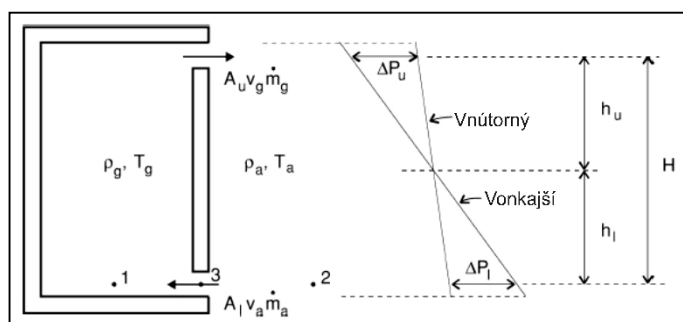


Obrázok 16 Tlakové rozdiely a neutrálna rovina (Karlsson, Quintiere 2000)

Využitím Bernoulliho rovnice pre prietok plynov v rôznych výškach ( $h_1$ ,  $h_2$ ) a spojením hydrostatických a hydrodynamických predstáv dostávame [27].

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 \cdot h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = p_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 \cdot h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad [27]$$

Pre rýchlosť pohybu horúcich plynov von cez horný otvor a vzduchu dnu cez dolný otvor na základe rozdielu tlakov podľa obrázku 17 dostávame [28 a 29] pre stred otvorov.  $H$  je vzdialenosťou stredov otvorov,  $A$  je plocha otvoru,  $h_u$  je vzdialenosť od neutrálnej roviny k stredu horného otvoru,  $h_l$  je vzdialenosť neutrálnej roviny od stredu dolného otvoru.



Obrázok 17 Výmena plynov cez dva otvory nad sebou (Karlsson, Quintiere 2000)

$$v_g = \sqrt{\frac{2 \cdot h_u \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [28]$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot h_l \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \quad [29]$$

Rovnice sa uvádzajú častejšie v závislosti na teplote s využitím vzťahu [30].

$$\rho = \frac{353}{T} \quad [30]$$

### Hmotnostný tok plynov cez otvory

Ak uvažujeme konštantný tlakový rozdiel v celej výške otvoru a konštantnú rýchlosť prúdenia plynov (výnimkou sú okraje otvoru), hmotnostný tok cez horný otvor vypočítame podľa [31] a cez dolný otvor podľa [32].

$$\dot{m}_g = C_d \cdot A_u \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_u \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [31]$$

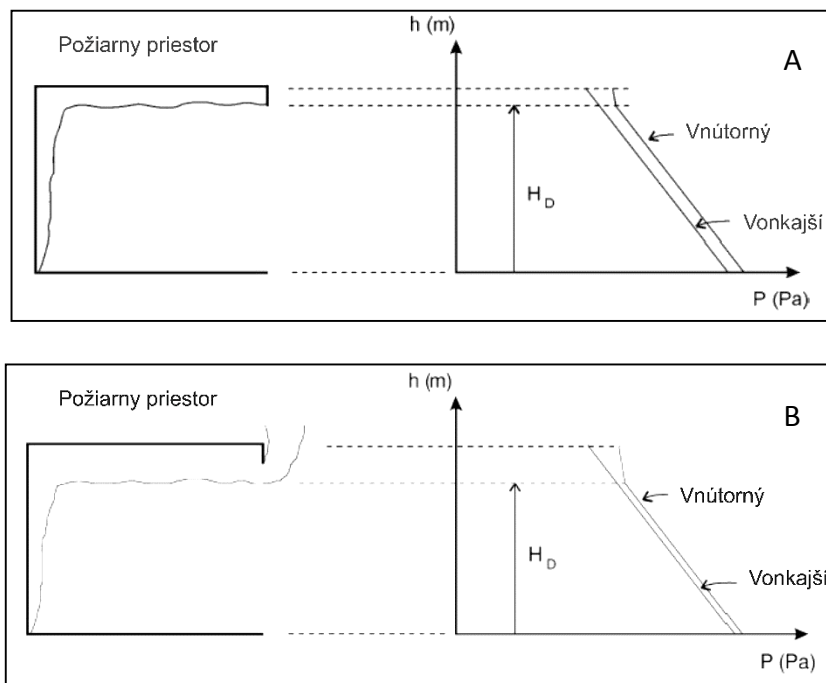
$$\dot{m}_a = C_d \cdot A_l \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_l \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [32]$$

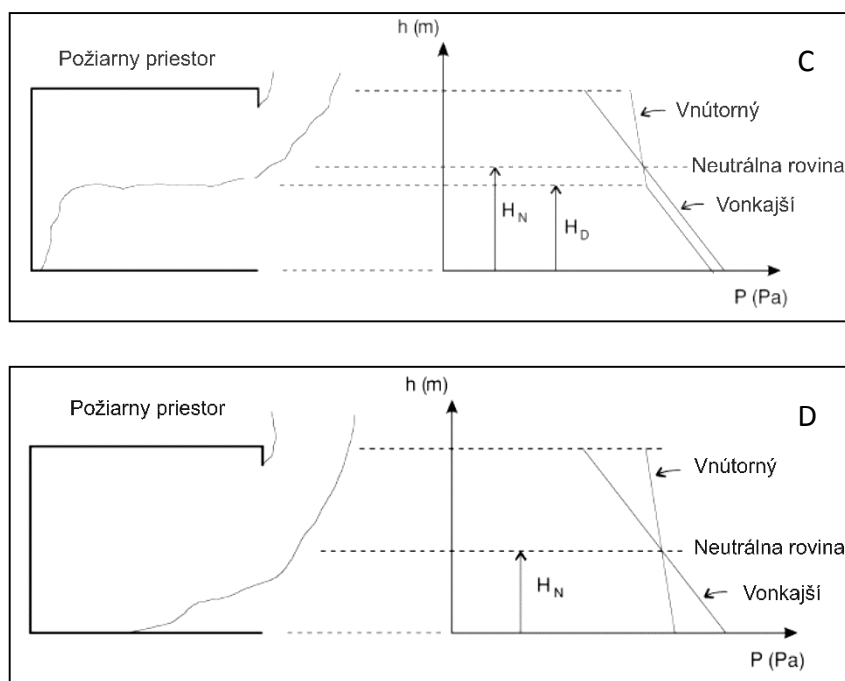
Pre výmenu plynov cez otvory platí  $\dot{m}_g = \dot{m}_a$ . Ak nie je daná poloha neutrálnej roviny, využijeme vzťah  $H = h_u + h_l$ . Pomer medzi výškami vyjadríme pomocou hustôt alebo teplôt plynov [33].

$$\frac{h_l}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_l}\right)^2 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_a} = \left(\frac{A_u}{A_l}\right)^2 \cdot \frac{T_a}{T_g} \quad [33]$$

### Tlakové profily pri vnútorných požiaroch s odvetraním

Pri veľkých otvoroch (okná, dvere),  $\Delta p$  kolíše od pozitívnych do negatívnych hodnôt cez výšku otvoru. Pre správny popis je potrebné rozlíšiť 4 fázy rozvoja požiaru s rôznymi tlakovými profilmi - fázy A, B, C, D (obrázok 18). V prvých dvoch fázach (A, B) sa používa na popis dvojzónový model. Vrstva relatívne čistého vzduchu zasahuje do výšky  $H_D$  od podlahy, závisí od hrúbky dymovej vrstvy. V celom priestore je kladný  $\Delta p$ . Vo fáze A prúdia von studené plyny, vo fáze B prúdia von horúce aj studené plyny. Vo fáze C sa na popis používa rozvrstvený dvojzónový model.  $H_N$  je výška neutrálnej roviny, nad  $H_N$  prúdia horúce plyny von, vo výške  $H_N$  nedochádza k výmene plynov, lebo rozdiel tlakov je nulový, pod  $H_N$  je  $\Delta p$  negatívny, chladný vzduch prúdi dnu. Pre výpočet musíme poznať  $H_N$  a  $H_D$ . Fáza D je plne rozvinutý požiar, na popis sa používa jednozónový model, horúce plyny takmer dosiahli podlahu, oba tlakové profily sú lineárne, pretínajú sa v  $H_N$ ,  $\Delta p$  je pod ňou negatívny, nad ňou pozitívny, nepoznáme len  $H_N$ .

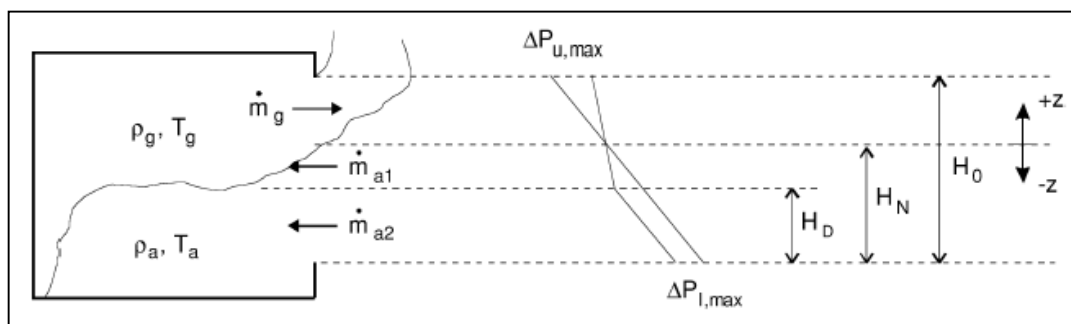




Obrázok 18 Tlakové profily a výšky vo fázach výmeny plynov A, B, C, D (Karlsson, Quintiere 2000)

### Výmena plynov pre dvojzónový model

V hornej časti priestoru sa nachádza vrstva horúcich plynov, v dolnej studený vzduch s teplotou okolia (obrázok 19). Všetky výšky sú merané od spodného okraja otvoru, ktorý má výšku  $H_0$  a šírku  $W$ , výška neutrálnej roviny  $H_N$  a výška zadymenia  $H_D$  sú neznáme, tlakový profil rozdelíme do troch úrovní, prvá úroveň je nad  $H_N$ , kde prúdia horúce plyny von [34], druhá úroveň je medzi  $H_N$  a  $H_D$ , kde vzduch prúdi dnu [35] a tretia úroveň je pod  $H_D$  a vzduch prúdi dnu [36].



Obrázok 19 Hmotnostný tok plynov – dvojzónový model (Karlsson, Quintiere 2000)

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \cdot \sqrt{(H_0 - H_N)^3} \quad [34]$$

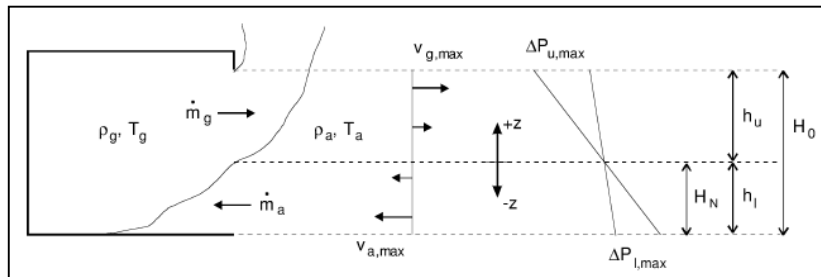
$$\dot{m}_{a1} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot \sqrt{(H_N - H_D)^3} \quad [35]$$

$$\dot{m}_{a2} = C_d \cdot W \cdot H_D \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H_N - H_D) \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \quad [36]$$

V rovniciach sú dve neznáme  $H_N$  a  $H_D$ , ktoré sú vo vzťahu k výške otvoru  $H_o$ , preto nie je explicitné riešenie pre výšku neutrálnej roviny. V praktických výpočtoch býva zadaná jedna z týchto výšok, najčastejšie je to  $H_D$ .

### Výpočet výmeny plynov pre jednozónový model

Predpokladom je rovnaká teplota v celom objeme priestoru, rôzna od vonkajšej teploty. Dá sa aplikovať pre fázu post-flashover, keď horúce plyny zaplnili celý priestor (obrázok 20). Hmotnostný tok sa mení s výškou od neutrálnej roviny, preto sa zavádza výška  $z$ . V zóne  $+z$  prúdia horúce plyny z miestnosti, v zóne  $-z$  prúdi studený vzduch do miestnosti.



Obrázok 20 Hmotnostný tok plynov – jednozónový model (Karlsson, Quintiere 2000)

Z rovnosti hmotnostného toku horúcich plynov otvorom von [37] a vzduchu otvorom dnu [38] sa dá odvodiť výška neutrálnej roviny  $H_N$ , ktorá je totožná s výškou  $h_l$  [39].

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \cdot \sqrt{h_u^3} \quad [37]$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot \sqrt{h_l^3} \quad [38]$$

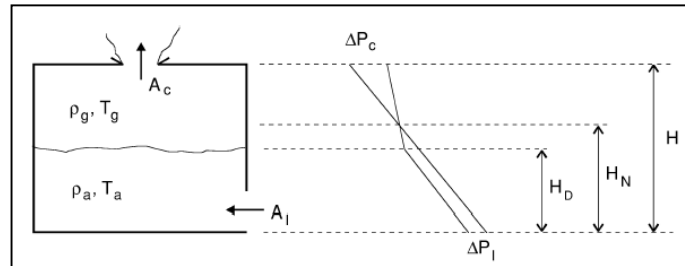
$$h_l = \frac{H_o}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_a}{\rho_g}}} \quad [39]$$

Na zjednodušené odhady sa používa rovnica rýchlosti hmotnostného toku [40], ktorá platí pre požiare, kde  $T_g > 300$  °C.

$$\dot{m}_a = 0,5 \cdot A \cdot \sqrt{H_o} \quad [40]$$

## Prietok plynov cez strešné otvory

V miestnosti s výškou  $H$  sa nachádza vrstva čistého vzduchu do výšky  $H_D$ , neutrálna rovina je vo výške  $H_N$ . Horúce plyny sú odvádzané cez stropný otvor s plochou  $A_c$ , vzduch prúdi dnu cez otvor pri podlahe s plochou  $A_l$  (obrázok 21).



Obrázok 21 Prietok plynov cez strešné otvory (Karlsson, Quintiere 2000)

Z rovnosti hmotnostného toku cez stropný otvor [41] a dolný otvor vyjadríme výšku neutrálnej roviny [42].

$$\dot{m}_c = C_d \cdot A_c \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H_N - H_D) \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [41]$$

$$H_N = \frac{A_l^2 \cdot \rho_a \cdot H_D + A_c^2 \cdot \rho_g \cdot H}{A_l^2 \cdot \rho_a + A_c^2 \cdot \rho_g} \quad [42]$$

Limitujúcimi podmienkami je konštantná teplota plynov, vietor nesmie mať vplyv na tlakové rozdiely. Aby cez veľkú plochu strešného otvoru nevznikal dvojsmerný tok, je rozdelený na viac malých otvorov.

### 2.2.5 Teplotné zmeny a odvod tepla pri požiari

#### Teplota plynov pri požiari

Odhad teploty horúcich plynov v priestore požiaru je dôležitou informáciou pre stanovenie nebezpečných podmienok pre ľudí, vznik flashover, kolaps konštrukčných prvkov ale aj spätný tepelný tok na horľavé látky.

Dosiahnutá teplota závisí od celkového uvoľneného tepla. Môže byť vyjadrené ako požiarne zaťaženie, čo je celková energia uvoľnená horením všetkých horľavých materiálov,  $Q$  (MJ). Hustota požiarneho zaťaženia je požiarne zaťaženie na jednotku plochy,  $Q''$  (MJ·m<sup>-2</sup>). Simulované požiarne zaťaženie zohľadňuje geometriu požiarnych úsekov, otvorov, množstva horľavej látky a termických vlastností materiálov.



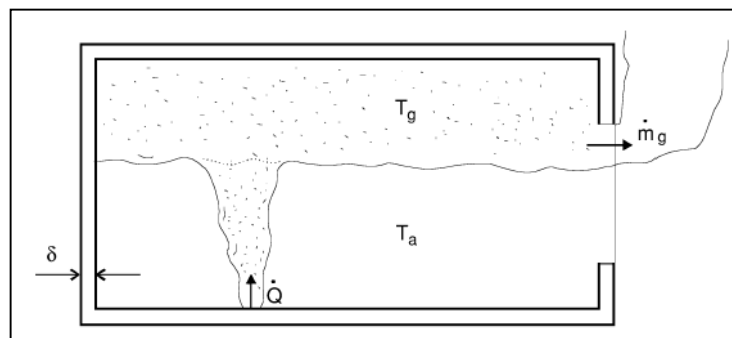
Odvod tepla a spalín z priestoru požiaru sa uskutočňuje cez otvory. Ventilačný faktor je úmerný Rýchlosť prietoku vzduchu cez otvory počas fázy post-flashover je úmerná ventilačnému faktoru  $A_o \cdot \sqrt{H_o}$  ( $A_o$  je plocha otvoru,  $H_o$  je výška otvoru). Delením ventilačného faktoru celkovou plochou ohraničujúcich povrchov  $A_t$  dostávame faktor otvorov  $\frac{A_o \cdot \sqrt{H_o}}{A_t}$ .

### Hodnotenie teploty plynov

Významnou charakteristikou pre hodnotenie prostredia pri vnútorných požiaroch je teplota plynov. Uplatňujú sa rôzne prístupy pre fázu pre-flashover a post-flashover. Vo fáze pre-flashover je potrebné zabezpečiť únik ľudí do 30 min. Na nárast teploty vplyva HRR. Teplota závisí od polohy, je vysoká v plameňoch, zmeny vo vzostupnom prúde spalín spôsobuje ochladzovanie nasávaným vzduchom. Jednoduchý popis umožňuje dvojfázový model (horúca horná vrstva, dolná s teplotou okolia). Vo fáze post-flashover je potrebné zabezpečiť 0,5-3 h bez kolapsu konštrukcie. Využíva sa jednofázový model (celá miestnosť vyplnená plynmi rovnakej teploty).

### Výpočet teploty plynov vo fáze pre-flashover

Východiskom je energetická a hmotnostná rovnováha so zahrnutím hmotnostného toku plynov. Miestnosť má výšku otvoru  $H_o$ , plochu otvoru  $A_o$ , steny s hrúbkou  $\delta$ , tepelnou vodivosťou  $k$ , hustotou  $\rho$  a tepelnou kapacitou  $c$  (obrázok 22).



Obrázok 22 Teploty plynov v dvojfázovom modeli (Karlsson, Quintiere 2000)

Pre rôzne vyjadrenia energetickej rovnováhy je dôležitý vplyv dominantných a vedľajších procesov. Dominantnými sú HRR, rýchlosť úbytku energie únikom plynov otvorom a rýchlosť úbytku energie ohrevom ohraničujúcich povrchov [43]. Ohrev stien zahŕňa konvekciu na tuhé povrchy a kondukciu do tuhej látky, ktorá je dominantná [44]. Vedľajšími procesmi sú tepelné straty radiáciou cez otvory a ohrievanie plynov.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot c_p \cdot (T_g - T_a) + \dot{q}_{strata} \quad [43]$$

$$\dot{q}_{strata} = h_k \cdot A_T \cdot (T_g - T_a) \quad [44]$$

Kde  $c_p$  je izobarická tepelná kapacita vzduchu,  $h_k$  je koeficient efektívnej tepelnej vodivosti tuhých ohraničujúcich povrchov,  $A_T$  je plocha povrchov bez otvorov.

Z analýzy teploty plynov pre reálne požiare a z konštantných hodnôt (ťažové zrýchlenie, hustota vzduchu, teplota studeného vzduchu) bola odvodená rovnica pre zvýšenie teploty hornej vrstvy [45].

$$\Delta T = 6,85 \cdot \sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2}{A_o \cdot \sqrt{H_o} \cdot h_k \cdot A_T}} \quad [45]$$

Pri výpočte prenosu tepla kondukciou do tuhej látky sa využíva plocha kontaktu horúcich plynov so stenami, tá sa mení pri zostupnom posune neutrálnej roviny. Neuvažuje sa s ochladzovaním povrchu, t.j.  $T_s = T_g$ . Ak je ohraničujúca stena tenká, alebo proces vyrovnania teploty prebieha dlho, uvažujeme o stacionárnom priebehu procesu kondukcie. Pre kombináciu materiálov (strop, steny, podlaha) a pre kompozitné vrstvené materiály je potrebné využiť zložitejšie rovnice pre výpočet koeficientu efektívnej tepelnej vodivosti  $h_k$ . Rovnicu [45] možno využiť v teplotnom intervale 20-600 °C a ohnisko požiaru nesmie byť ovplyvňované stenami.

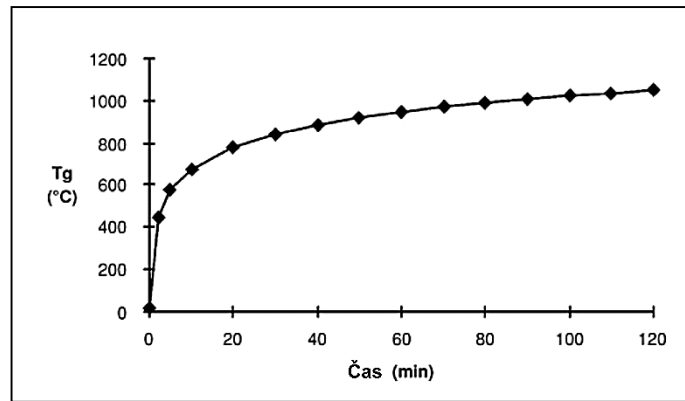
Dôležitou otázkou je predpovedanie vzniku flashover, t.j. stavu, keď teplota hornej vrstvy dosiahne 500-600 °C. Využíva sa rovnica pre výpočet rýchlosti uvoľňovania tepla na dosiahnutie teploty flashover [46]. Pre steny z betónu je čas stacionárneho vedenia tepla niekoľko hodín, požiar pomaly narastá do dosiahnutia  $\dot{Q}_{FO}$ .

$$\dot{Q}_{FO} = 610 \cdot \sqrt{h_k \cdot A_T \cdot A_o \cdot \sqrt{H_o}} \quad [46]$$

### Výpočet teploty plynov v post-flashover

Základom výpočtov a meraní je požiarne zaťaženie komponentov podľa normovej teplotnej krivky alebo simulovaného prirodzeného požiarneho zaťaženia. Normová teplotná krivka (štandardná, ISO 834) [47], kde  $t$  je čas v min (obrázok 23), sa používa na klasifikáciu testovaných elementov podľa času do štrukturálneho kolapsu alebo zlyhania funkcie. Pre špeciálne prípady sa používajú zaťaženia podľa podobných kriviek, napr. uhl'ovodíková a teplotná krivka vonkajšieho požiaru.

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [47]$$



Obrázok 23 Normová teplotná krivka (Karlsson, Quintiere 2000)

Simulované prirodzené požiarne zaťaženie vychádza z teplotno-časovej krivky v závislosti na hustote požiarneho zaťaženia, faktore otvorov a termických vlastnostiach ohraničujúcich povrchov. Hustota požiarneho zaťaženia sa vypočíta podľa [48], kde  $M_i$  je hmotnosť a  $\Delta H_{ef,i}$  je efektívne spaľovacie teplo. Ak nie je známe vnútorné zariadenie, uvádzajú sa štatistické hodnoty  $Q_t''$  ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) pre určité priestory (byt 150-170  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , škola 100  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , nemocnica 150  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , hotel 80  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

$$Q_t'' = \frac{\sum_i^n M_i \cdot \Delta H_{ef,i}}{A_t} \quad [48]$$

Rovnica [49] udáva maximálnu rýchlosť uvoľňovania energie pri plne rozvinutom požiari. Je základom na výpočet tepelnej rovnováhy a následne teploty horúcich plynov. V praxi sa využívajú softvérové programy.

$$\dot{Q} = 0,09 \cdot A_o \cdot \sqrt{H_o} \cdot \Delta H_{ef,drevo} \quad [49]$$

## 2.2.6 Dym a toxické produkty horenia pri vnútorných požiaroch

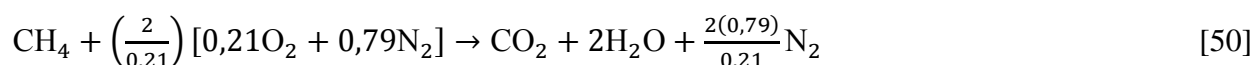
Zvláštnu pozornosť pri charakteristike dymu je potrebné venovať oxidu uhoľnatému, oxidu uhličitému, kyslíku, uhl'ovodíkom, uhlíku a optickej priepustnosti plynov. Zo známeho výťažku produktov horenia a pyrolýzy sa musí vypočítať koncentrácia v spalinách. Spaliny sú zriedované vzduchom vnikajúcim do ich vzostupného prúdu, časť z nich uniká otvormi.

Pri dokonalom horení chemickou reakciou z paliva všeobecného zloženia  $C_xH_yO_z$  vzniká len  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Pri požiari vznikajú aj iné látky. Množstvo jednotlivých zložiek vyjadrujeme vo vzťahu k ekvivalentnému pomeru  $\Phi$ , čo je pomer hmotnosti paliva a kyslíka (vzduchu) delený stechiometrickým koeficientom  $r$  (podiel hmotnosti paliva reagujúceho s jednotkovou hmotnosťou kyslíka).

Výt'azok zložky spalín  $y_i$ , je hmotnosť zložky spalín vzniknutej z plynného paliva. Maximálny výt'azok zložky spalín  $y_{i,max}$ , je maximálny teoretický výt'azok. Normalizovaný výt'azok zložky spalín je výt'azok delený výt'azkom pri neobmedzenom prísune kyslíka (vzduchu) alebo maximálnym výt'azkom  $y_i/y_{i,\infty}$ ,  $y_i/y_{i,max}$ .

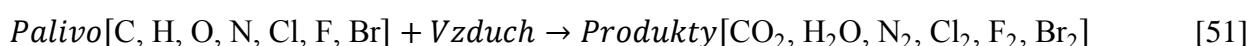
Vznik a rozšírenie spalín ovplyvňuje ľudí, majetok, prostriedky a operácie. Vysvetlenie tvorby spalín vyžaduje podrobné poznanie ich chémie a teórie horenia. Základnými východiskami sú: model horenia (plameňové, bezplameňové, termická degradácia, pyrolýza), dostupnosť kyslíka, chemické zloženie palív a chemická retardácia horenia. Problémom je, že palivá nie sú chemicky čisté látky a podmienky horenia nie sú definované.

Základom odhadu zloženia produktov horenia pri vnútorných požiaroch je chemická reakcia každého paliva v procese horenia. Jednoduché plynné palivo, metán, zhorí na vzduchu úplným dokonalým horením podľa reakcie [50].



Prerušenie procesu horenia zložitejších palív vedie k vzniku oxidu uhoľnatého (CO), vodíka (H<sub>2</sub>), sadzí (C), uhoľovodíkov (HC) a iných produktov rekombinačných reakcií pri termickej degradácii a oxidácii. Signifikantným faktorom je množstvo a dostupnosť vzduchu (kyslíka). Pri požari môže byť popísané termínmi: nadmerná ventilácia (odvetranie), dobrá ventilácia (odvetranie), nedostatočná ventilácia (odvetranie).

Chemická reakcia dokonalého horenia paliva je nasledovná [51]:



V reálnych podmienkach požiaru prebieha dokonalé horenie len zriedkavo, častejšie sú produkty CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, HC, sadze (C), N<sub>2</sub>, HCN, HCl, HF, HBr. Pri dobre odvetraných požiaroch vznikajú CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a N<sub>2</sub> v takmer ideálnych množstvách. Pri nedostatočnom vetraní, tlení, termickom rozklade, vzniká zvýšené množstvo CO, sadzí a uhoľovodíkov.

Maximálny výt'azok zložky spalín ľahko vypočítame zo stechiometrickej reakcie. Pre CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O získame reálne výsledky, ale pre CO nereálne, pretože sa predpokladá, že pri dobre odvetraných požiaroch nevzniká CO<sub>2</sub>. Napr. pre n-bután  $y_{\text{CO}_2,max} = 3,0$  g/g,  $y_{\text{CO}_2,\infty} = 2,85$  g/g, ale  $y_{\text{CO},max} = 1,91$  g/g,  $y_{\text{CO},\infty} = 0,005$  g/g.

Hmotnostná optická hustota dymu  $D_m$ , závisí od výťažku sadzí  $y_s$  [52], kde  $\alpha$  je optická hustota čiaštočky alebo aerosólu, má hodnoty 1,9-3,3  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , ale nie je konštantná, je funkciou výťažku sadzí. Vzďialenosť, na ktorú vidieť svietiace objekty, je nepriamo úmerná k  $D_m$ .

$$D_m = \alpha \cdot y_s \quad [52]$$

Pričom sa vychádza z procesu vzniku spalín podľa ideálnej stechiometrickej reakcie [53].



Výťažok zložiek spalín pri nedostatočnom množstve vzduchu (kyslíka) je závislý na stupni prebytku paliva vyjadrenom ako ekvivalentný pomer  $\Phi$  [54], kde  $m_f$  a  $m_{ox}$  je hmotnosť dostupného paliva a kyslíka,  $r$  je ideálny stechiometrický pomer paliva a kyslíka pre dokonalé úplné zhorenie. Rozsah  $\Phi$  je  $0-\infty$  pre čistý kyslík alebo palivo.

$$\Phi = \frac{m_f/m_{ox}}{r} \quad [54]$$

Pre odchýlky od ideálneho dokonalého horenia je nevyhnutné poznať stechiometriu, alebo najst' závislosť koncentrácie zložiek na  $\Phi$ . V praxi sa vyjadrujú výťažky zložiek spalín  $y_p$  vo vzostupnom prúde spalín vo vzťahu k odvetraniu. To vplýva na pomer hmotnostného toku paliva  $\dot{m}_f$  a hmotnostného toku zreagovaného paliva  $\dot{m}_{f,react}$ .

Pre dobre odvetrané požiare, kde  $\Phi < 1$ , a  $\dot{m}_f = \dot{m}_{f,react}$ , možno normalizovaný výťažok zložky spalín vyjadriť rovnicou [55]. Pre nedostatočne odvetrané požiare, kde ( $\Phi > 1$ ,  $\dot{m}_f > \dot{m}_{f,react}$ ,  $r = f(\Phi)$ ), výťažok sa dá vyjadriť vzťahom [56]. V takom prípade aktuálna závislosť musí byť stanovená pre každé palivo.

$$\frac{y_p}{y_{p,\infty}} = \frac{1}{\Phi} \quad [55]$$

$$\frac{y_p}{y_{p,\infty}} = f(\Phi) \quad [56]$$

### Odhad výťažkov spalín

Vznik spalín pri vnútornom požiarí je komplexný dej, pri odhade výťažkov sa využívajú aproximácie. Z výťažkov sa odhadujú koncentrácie zložiek. Pre nedostatočne vetraný požiar je výťažok CO niekoľkokrát vyšší než pri dostatočne vetranom, výťažok  $\text{CO}_2$  je asi 10-krát vyšší než CO. Z výsledkov experimentov vyplýva, že len výťažok CO závisí od materiálu, približne pre  $\Phi = 4$  dochádza k prechodu od plameňového k bezplameňovému horeniu.

Pre ideálny prípad úplného dokonalého horenia, kde  $\Phi < 1$ , jedná sa teda o dobre odvetraný požiar, platí pre výťažky zložiek spalín [57, 58].

$$\frac{y_{CO_2}}{y_{CO_2,\infty}} = \frac{y_{H_2O}}{y_{H_2O,\infty}} = \frac{y_{O_2}}{y_{O_2,\infty}} = 1 \quad [57]$$

$$y_{CO} = y_{H_2} = y_{HC} = 0 \quad [58]$$

V prípade nedostatočne odvetraného požiaru, kde  $\Phi > 1$ , množstvo  $CO_2$ ,  $H_2O$  a  $O_2$  je závislé na ekvivalentnom pomere [59], ale vznikajú aj uhl'ovodíky (HCs) [60].

$$\frac{y_{CO_2}}{y_{CO_2,\infty}} = \frac{y_{H_2O}}{y_{H_2O,\infty}} = \frac{y_{O_2}}{y_{O_2,\infty}} = \frac{1}{\Phi} \quad [59]$$

$$y_{HC} = 1 - \frac{1}{\Phi} \quad [60]$$

Dominantný toxický plyn v dyme je CO, preto má veľký význam predpovedať jeho výťažok a vypočítať koncentráciu. Z experimentálnych údajov bol vyjadrený výťažok CO ako funkcia ekvivalentného pomeru vo vzostupnom prúde spalín a v hornej vrstve [61, 62, 63].

$$\text{pre } \Phi < 0,5 \quad y_{CO} = 0 \text{ g/g} \quad [61]$$

$$\text{pre } 0,5 < \Phi < 1,2 \quad y_{CO} = (0,3 \Phi - 0,15) \text{ g/g} \quad [62]$$

$$\text{pre } \Phi > 1,2 \quad y_{CO} = 0,21 \text{ g/g} \quad [63]$$

Pri reálnych požiaroch je v iniciačnej fáze množstvo CO nízke, po dosiahnutí flashover sa skokovite zvyšuje, pričom časť z neho môže zhorieť po prísune vzduchu vzniknutými otvormi.

### **3 PROGRESÍVNE METÓDY ZISŤOVANIA POŽIARNOTECHNICKÝCH CHARAKTERISTÍK MATERIÁLOV V POŽIARNOM INŽINIERSTVE**

V súčasnosti sa v testovaní materiálov a stavebných konštrukcií využíva veľké množstvo normalizovaných aj nenormalizovaných skúšobných metód. Normalizované skúšobné metódy sa používajú predovšetkým na účely preukázania splnenia požiadaviek kladených na materiál alebo výrobok platnými právnymi predpismi. Nenormalizované skúšobné metódy nachádzajú uplatnenie predovšetkým v oblasti vedy a výskumu, ale aj v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov (napr. rekonštrukcia požiarov v laboratórnej mierke). Je však potrebné pripomenúť, že pomerne veľké množstvo normalizovaných skúšobných metód vzniklo pôvodne vo výskumných laboratóriách ako nenormalizované. Až postupom času, keď výsledky vedeckého výskumu dokazovali, že na základe výsledkov týchto skúšok je možné urobiť spoľahlivý odhad správania sa materiálu v určitej fáze rozvoja požiaru, boli tieto metódy zakotvené v technických normách (Martinka, Balog 2014).

Z hľadiska klasifikácie skúšobných metód je možné uviesť nasledovné členenie, ktoré sa považuje za jedno z najjednoduchších: skúšobné metódy pre pevné horľavé materiály alebo výrobky; skúšobné metódy pre horľavé kvapaliny; skúšobné metódy pre horľavé plyny a skúšobné metódy pre horľavé prachy. Iné rozdelenie skúšobných metód je možné podľa účelu aplikácie materiálu alebo výrobku, napr. stavebné materiály a výrobky, odevy a textílie, nábytok, hračky, plasty. Z pohľadu mierky testovania a tiež aj veľkosti testovanej vzorky môžu byť skúšky rozdelené na analytické, pri ktorých sa hmotnosť vzorky pohybuje rádovo v miligramoch, ďalej laboratórne, u ktorých sa hmotnosť vzorky pohybuje rádovo od jednotiek gramov až po niekoľko kilogramov. Pri strednorozmerových skúškach (materiál, výrobok) majú vzorky hmotnosť rádovo v kilogramoch až stovkách kilogramov. Za veľkorozmerové skúšky môžu byť považované skúšky zamerané na výskum správania sa určitého väčšieho celku, ktorého rozmer je rádovo rovnaký, ako rozmer rovnakého celku používaného v technickej praxi, pričom môže ísť o skúšku celej budovy alebo časti budovy (Martinka, Balog 2014).

Podľa fázy rozvoja požiaru (Martinka, Balog 2014) sa požiarne skúšky delia na skúšky iniciačných charakteristík (teplota alebo bod vzplanutia a vznietenia, kritická hustota tepelného toku, sklon materiálu k samovznieteniu), skúšky rýchlosti šírenia plameňa, skúšky rýchlosti uvoľňovania tepla, skúšky zamerané na posúdenie sklonu materiálu šíriť požiar vo fáze flashover, skúšky požiarnej odolnosti konštrukcií a skúšky zamerané na toxicitu splodín horenia a optickú hustotu dymu.

V tejto kapitole sú bližšie popísané jednotlivé požiarotechnické charakteristiky materiálov a konštrukcií a spôsoby ich testovania prostredníctvom progresívnych analytických metód požiarneho inžinierstva. Výstupy týchto testovaní predstavujú základnú bázu údajov potrebných pre matematické modelovanie vnútorných požiarov.

### **3.1 Materiály a ich základné požiarotechnické charakteristiky**

Materiál predstavuje látku určenú na konkrétne technické použitie a ďalšie spracovanie. Pri popise a analýze materiálov sa využívajú poznatky a postupy z chémie, fyziky, matematiky, mineralógie, mechaniky a rôznych experimentálnych techník.

Z hľadiska klasifikácie rozdeľujeme materiály na prírodné a syntetické. Obe skupiny môžu zahŕňať materiály organické (biomasa) a neorganické (žula, keramika).

Pre určenie vlastností horľavých látok slúžia jednotlivé parametre, ktoré umožňujú posúdiť ich chemické a fyzikálne správanie. Jednotlivé parametre sú viazané na skupenstvo a platia výhradne preň. Tieto veličiny alebo parametre dovoľujú požiaro-technické zhodnotenie a tým stanovenie jednotlivých opatrení, ako aj využitie bezpečnostných zariadení a prístrojov.

Martinka (2015) uvádza, že posúdenie sklonu tuhých materiálov alebo výrobkov k iniciácii je možné vykonať na základe teploty vznietenia, teploty vzplanutia, kyslíkového čísla a kritickej hustoty tepelného toku. Sklon horľavých kvapalín k iniciácii sa posudzuje na základe bodu vzplanutia, bodu horenia a kritickej hustoty tepelného toku.

Vo všeobecnosti k najdôležitejším vlastnostiam horľavých látok však patrí bod vzplanutia (u horľavých kvapalín), bod horenia (u horľavých kvapalín), teplota vznietenia (u horľavých kvapalín aj pevných látok), medze výbušnosti (u zmesí plynov, pár a prachov so vzduchom), spalné (spaľovacie) teplo, samovznietenie.

#### **3.1.1 Bod vzplanutia**

Všetky kvapaliny uvoľňujú pary, ktoré sa v uzavretom priestore zhromažďujú nad hladinou. Koncentrácia pár je závislá od tlaku pár a tým aj od teploty.

Bod vzplanutia horľavej kvapaliny je najnižšia teplota, vzťahnutá na tlak 101,325 kPa, pri ktorej sa z kvapaliny uvoľní toľko pár, že nad hladinou kvapaliny sa utvorí plameňom zapáliteľná zmes pár so vzduchom.

Pri teplote vzplanutia sa utvorená zmes zapáli krátkodobým priblížením otvoreného plameňa. Oddialením plameňa horenie nepokračuje, rýchlosť odparovania je ešte nízka (menšia ako rýchlosť horenia), takže nie sú dodávané pary k stálemu horeniu. Pri bode vzplanutia musí teda



horenie vždy prestať. Pod bodom vzplanutia je akékoľvek zapálenie horľavej kvapaliny úplne vylúčené.

Bod vzplanutia je silne závislý od vonkajších podmienok. Tieto údaje majú praktický zmysel len vtedy, ak sú určené podmienky skúšky a aparátúra, ktorou bol bod vzplanutia určený. V opačnom prípade môžu vzniknúť veľké odlišnosti.

### **3.1.2 Bod horenia**

Zahrievaním horľavej kvapaliny nad bod vzplanutia sa zvyšuje rýchlosť odparovania. Dôsledkom toho je skutočnosť, že pri určitej teplote je rýchlosť odparovania rovná alebo väčšia ako rýchlosť horenia. Ak sa priblíži pri tejto teplote k hladine kvapaliny plamienok, horí kvapalina po vzplanutí plynule ďalej.

Bod horenia je teplota látky, pri ktorej sa vytvorí toľko pár, že tieto pri priblížení otvoreného plamienka vzplanú a horia bez prerušenia ďalej.

Bod vzplanutia a bod horenia sú teda rôzne teploty. Rozdiel medzi nimi je tým väčší, čím vyšší je bod vzplanutia horľavej kvapaliny. Ak je bod vzplanutia nízky, je rozdiel medzi bodom vzplanutia a horenia minimálny.

### **3.1.3 Teplota vznietenia**

Ak vychádzame z toho, že zapálenie nejakej látky nie je závislé len od plameňa, elektrickej iskry alebo rozžeraveného drôtika, dôjdeme k poznatku, že je možné zapáliť zmes látky s kyslíkom prípadne vzduchom určitým zvýšením teploty.

Teplota vznietenia je najnižšia teplota, na ktorú musí byť zmes látky so vzduchom zahriata, aby sa okamžite zapálila.

Teplota vznietenia je závislá od mnohých faktorov, z ktorých najdôležitejšie sú energia vznietenia (druh prenosu energie na horľavý súbor), oxidačný prostriedok (najčastejšie vzduch), priestor (objem, stav prúdenia a premiešania), materiál nádoby (katalytické vplyvy).

Okrem týchto faktorov na teplotu vznietenia vplýva tlak, odvod tepla, priebeh reakcie, štruktúra látky (stabilita molekuly a jej afinita ku kyslíku).

Vo väčšine prípadov neexistuje vzťah medzi bodom vzplanutia a teplotou vznietenia.

### **3.1.4 Medze výbušnosti**

Explózia je druh horenia prebiehajúci veľkou rýchlosťou a za vývinu tlaku. Vysoká rýchlosť horenia je však len vtedy možná, keď je dosiahnuté dostatočné premiešanie horľavej látky

s oxidačným prostriedkom. Najlepšie premiešanie sa vyskytuje vtedy, keď sú jednotlivé častice v molekulovej forme, teda ako para alebo plyn. Možnosť explózie vzniká teda u plynov, pár a prachov. Rozsah zapáliteľnosti zmesi závisí od pomeru zmiešania horľavej látky a oxidačného prostriedku (najčastejšie vzduchu).

Oblasť výbušnosti je rozmedzie medzi dolnou a hornou medzou výbušnosti. Medze výbušnosti udávajú najmenší alebo najväčší obsah horľavých plynov, pár alebo prachov vo vzduchu a to v objemových percentách alebo gramoch na  $m^3$ , ktorý musí byť prítomný, aby došlo k vznieteniu explozívnej zmesi.

Pri parách možno tieto hodnoty nahradiť teplotnými medzami zapáliteľnosti. Rýchlosť odparovania je v uzavretom priestore bez prúdenia vzduchu závislá len od energie molekúl plynu alebo kvapaliny. Túto energiu možno vyjadriť teplotou, pretože tlak je priamo úmerný teplote a každému tlaku odpovedá určitá teplota.

Dolná teplotná medza zapáliteľnosti je zhodná s bodom vzplanutia. Pri tejto teplote sa totiž nad kvapalinou vytvorí toľko pár, že môžu vzplanúť. Horná medza výbušnosti odpovedá hornej teplotnej medzi zapáliteľnosti.

Teplotné medze zapáliteľnosti nie sú použiteľné pre plyny a prachy, pretože ich koncentrácie nie sú závislé od teploty. Vyparovanie kvapalín v otvorenej nádobe alebo vo veľkom priestore nie je ovplyvňované len teplotou, ale aj prúdením vzduchu a nie je takmer nikdy dosiahnutá podmienka, že v celom priestore budú nasýtené pary.

### **3.1.5 Kritická hustota tepelného toku**

Kritická hustota tepelného toku je minimálna hustota tepelného toku potrebná na iniciáciu procesu horenia materiálu (Babrauskas 2009).

Kritická hustota tepelného toku sa delí na kritickú hustotu tepelného toku s použitím prídavného zdroja zapálenia pôsobiaceho na produkty termického rozkladu (napr. malý plameň s výkonom  $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  alebo iskrový iniciátor) a kritickú hustotu tepelného toku bez použitia prídavného iniciačného zdroja pôsobiaceho na produkty termického rozkladu. Kritická hustota tepelného toku s použitím prídavného iniciačného zdroja sa ďalej delí na kritickú hustotu tepelného toku, ktorá iniciuje proces horenia materiálu, ale po odstránení zdroja externého tepelného žiarenia dôjde k samovoľnému uhaseniu horenia a na kritickú hustotu tepelného toku, ktorá iniciuje proces horenia materiálu a proces horenia pokračuje aj po odstránení externého zdroja tepelného žiarenia. Kritická hustota tepelného toku potrebná na iniciáciu materiálu bez použitia prídavného zdroja

zapálenia poskytuje informáciu o minimálnej hustote tepelného toku potrebnej na iniciáciu rozkladných produktov (Martinka, Balog 2014).

Kritická hustota tepelného toku môže byť zmeraná exaktným spôsobom, alebo vypočítaná na základe prevrátenej hodnoty indukčnej periódy iniciácie od hustoty tepelného toku. Indukčná perióda iniciácie je definovaná ako časový interval od zaťaženia vzorky definovanou hustotou tepelného toku alebo teploty do okamihu jej iniciácie. Meranie kritickej hustoty tepelného toku umožňuje kónický kalorimeter (Martinka, Balog 2014).

### **3.1.6 Spaľovacie/spalné teplo**

Spaľovacie/spalné teplo je také množstvo tepla, ktoré sa uvoľní dokonalým spálením jednotkového množstva paliva. Predpokladá sa, že voda, uvoľnená spaľovaním, skondenzuje a energiu chemickej reakcie nie je potrebné redukovať o jej skupenské teplo. Tým sa spaľovacie/spalné teplo líši od výhrevnosti, kde sa predpokladá na konci reakcie voda v plynnom skupenstve. Preto je hodnota spaľovacieho/spalného tepla vždy väčšia alebo rovná hodnote výhrevnosti.

### **3.1.7 Samovznietenie**

Samovznietenie je taký jav, pri ktorom sa horľavina vznieti už za normálnej teploty bez použitia nejakého vonkajšieho zdroja. Podstata procesu samovznietenia je u väčšiny horľavín rovnaká, ako u skôr popísaného procesu vznietenia, u niektorých horľavín sa však v počiatkovej fáze uplatňujú aj fyzikálne alebo biologické procesy.

Podľa toho, ktorý jav mal rozhodujúci význam v počiatkovom štádiu procesu samovznietenia na zvýšení teploty, delíme proces samovznietenia do štyroch skupín: samovznietenie spôsobené fyzikálnochemickými javmi, tepelné samovznietenie, samovznietenie chemické, samovznietenie biologické.

#### **Samovznietenie spôsobené fyzikálnochemickými javmi**

Príkladom tohto druhu samovznietenia je samovznietenie uhlia. K tomuto javu sú náchylné hlavne hnedé a niektoré druhy čierneho uhlia.

Samovznietenie uhlia je v počiatkovej fáze spôsobené hlavne absorpciou plynov a pár uhoľnou hmotou. Množstvo tepla, ktoré sa pri tomto pochode uvoľní, závisí od povahy pohlcovaných plynov a pár, a to na 0,01 g pohlcovaných vodných pár 22,6 J. Uvoľňovanie tepla absorpciou prebieha až do 60 – 75 °C, pri vyšších teplotách sa už viac uplatňuje oxidácia uhoľnej hmoty.

K samovznieteniu uhlia môže dôjsť len vtedy, keď je uhlie nahromadené vo veľkých hromadách a najmä keď je nerovnakej zrnitosti, čo uľahčuje prístup vzduchu k uhoľnej hmote. Samovznieteniu tiež napomáhajú popoloviny svojím katalytickým účinkom (hlavne soli dvojv mocného železa).

Samovznietenia nie sú schopné také druhy uhlia, ktoré majú vysoký obsah uhlíka, ako je antracit alebo iné látky s vysokým obsahom uhlíka, ako napr. koks.

### **Tepelné samovznietenie**

Pod pojmom tepelné samovznietenie rozumieme proces, pri ktorom dôjde ku vznieteniu horľaviny dlhodobým pôsobením pomerne nízkej teploty (cca 100 °C). K tomuto druhu samovznietenia majú sklon hlavne rôzne organické vláknité materiály, ako slama, seno, drevo, drevené piliny, bavlna, tabak atď. Schopnosť týchto látok k tepelnému samovznieteniu je možné experimentálne určiť. Táto schopnosť závisí od teploty prostredia, doby zohrievania a od rozmerov materiálu.

### **Chemické samovznietenie**

Za príčinu chemického samovznietenia považujeme exotermickú reakciu pri vzájomnom styku obyčajne dvoch chemických látok. Podľa schopnosti samovznietenia môžeme rozdeliť látky do troch skupín: látky, ktoré sa samy zapalujú účinkom vzdušného kyslíka, látky, ktoré spôsobujú zapálenie účinkom vody a látky, ktoré sa zapalujú pri vzájomnom zmiešaní.

K látkam zapalujúcim sa účinkom vzdušného kyslíka patria rôzne plynné, kvapalné, príp. pevné látky. Z plyných a kvapalných sú to napr. silány, borány, fosfány, organokovové zlúčeniny ako trietylhlinitik, organické deriváty fosforu, arzenu, antimónu atď. U týchto látok je obyčajne veľmi krátka indukčná perióda a k samovznieteniu dochádza veľmi rýchlo po zmiešaní so vzduchom. Tieto látky môžeme považovať za horľaviny s veľmi nízkou teplotou vznietenia, a to ležiace hlboko pod normálnou teplotou okolitého prostredia, t.j. cca 20°C.

## **3.2 Metódy zisťovania iniciačných požiarotechnických charakteristík materiálov**

Požiarne skúšky sú kľúčovou zložkou používanou v procese navrhovania opatrení zameraných na zaistenie požiarnej bezpečnosti prostredia.

Medzi progresívne metódy požiarneho skúšobníctva používané v praxi požiarneho inžinierstva možno zaradiť nasledovné analytické metódy: stanovenie teploty vzplanutia a vznietenia, bodu vzplanutia a horenia, medze výbušnosti; stanovenie nehorľavosti /horľavosti stavebných výrobkov; stanovenie náchylnosti materiálov na samovznietenie a teploty samovznietenia;

diferenciálna termická analýza a tepelná degradácia látok; stanovenie spaľovacieho/spalného tepla.

### 3.2.1 Určovanie bodu vzplanutia a bodu horenia horľavých kvapalín

Jednou z najdôležitejších požiarnotechnických charakteristík materiálov je bod vzplanutia a horenia. Táto vlastnosť sa pre horľavé kvapaliny stanovuje pomocou viacerých normalizovaných metód.

Jednou z nich je aj určovanie bodu vzplanutia a horenia v zmysle Clevelandovovej metódy v otvorenom téglíku. Ide o skúšobný postup podľa STN EN ISO 2592: 2003. Pri tejto skúške sa vzorka zahrieva v otvorenom téglíku predpísanou rýchlosťou. V určených teplotných intervaloch sa ponad téglík prechádza malým skúšobným plameňom. Najnižšia teplota korigovaná na tlak vzduchu prostredia, pri ktorej po priblížení skúšobného plameňa vzplanú výpary nad hladinou kvapaliny, sa považuje za bod vzplanutia. Pri určovaní bodu horenia sa v skúške pokračuje dovtedy, kým priblíženie skúšobného plameňa nespôsobí zapálenie a kým horenie vzorky trvá najmenej 5 sekúnd.



Obrázok 24 Prístroj podľa Clevelanda (PTEÚ MV SR 2014)

Pre stanovenie bodu vzplanutia horľavých kvapalín sa využíva najmä metóda v uzavretom téglíku – nerovnovážna metóda. Ide o skúšobný postup podľa STN EN ISO 2719: 2016. Pri tejto metóde sa skúšobná vzorka umiestni do skúšobného téglíka a ohrieva sa s cieľom vytvoriť konštantné stúpanie teploty nepretržitým miešaním. Zdroj zapálenia je nasmerovaný cez otvor vo viečku skúšobného téglíka v intervaloch regulovanej teploty so simultánnym prerušovaním miešania. Najnižšia teplota, pri ktorej aplikácia zdroja zapálenia spôsobí, že výpary skúšobnej vzorky vzplanú a šíria sa ponad povrch kvapaliny, sa zaznamená ako bod vzplanutia pri atmosférickom tlaku prostredia. Táto teplota sa koriguje na štandardný atmosférický tlak pomocou rovnice.



Obrázok 25 Prístroj podľa Penského-Martensa (PTEÚ MV SR 2014)

Pre určenie bodu vzplanutia horľavých kvapalín je možné okrem už spomenutej nerovnovážnej metódy aplikovať i metódu v uzavretom téglíku – rovnovážnu metódu. Ide o skúšobný postup podľa STN EN ISO 3679: 2017. Pri jej aplikácii sa určený objem skúšobnej vzorky nadávkuje do skúšobného téglíka, ktorý sa udržiava pri teplote predpokladaného bodu vzplanutia skúšaného materiálu. Po určenom čase sa aplikuje skúšobný plameň, pričom sa sleduje prítomnosť alebo neprítomnosť vzplanutia. Ďalšie skúšky sa vykonávajú s čerstvými skúšobnými vzorkami pri rozličnej teplote dovtedy, kým sa neurčí bod vzplanutia s predpísanou presnosťou.



Obrázok 26 Prístroj pre rýchlu rovnovážnu metódu (PTEÚ MV SR 2014)

Pre rovnaký účel je možné aplikovať aj skúšobný postup v zmysle STN EN 924: 2003. Pri aplikácii tohto skúšobného postupu sa skúšobná vzorka zahrieva v uzavretom téglíku ponorenom vo vhodnom kúpeli. Teplota kúpeľa sa rovnomerne zvyšuje tak, aby bol dodržaný predpísaný rozdiel medzi teplotou kvapaliny v kúpeli a teplotou vzorky v téglíku a zároveň aby teplota vzorky stúpala predpísanou rýchlosťou. V určených intervaloch sa uskutočňujú pokusy

o zapálenie vzorky. Zaznamená sa najnižšia teplota, pri ktorej vzorka vzplanie, ktorá sa koriguje na normálny atmosférický tlak 101,3 kPa.



Obrázok 27 Prístroj podľa Abela-Penského (PTEÚ MV SR 2014)

Pri aplikácii skúšobného postupu podľa STN EN 14522: 2006 sa skúšobná vzorka umiestni do téglíka Abelovho prístroja a zohrieva sa stanovenou rýchlosťou. Malý skúšobný plameň sa v pravidelných intervaloch nasmeruje do téglíka a bod vzplanutia sa zaznamená ako najnižšia teplota, pri ktorej skúšobný plameň spôsobí vzplanutie výparov nad skúšobnou vzorkou zreteľným zábleskom vnútri téglíka. Výsledok korigovaný na tlak 101,3 kPa sa zaokrúhľuje na najbližších 0,5°C.



Obrázok 28 Prístroj podľa Abela (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.2.2 Stanovenie teploty vznietenia plynov a pár

Pre stanovenie teploty vznietenia plynov a pár sa používa skúšobný postup podľa STN EN 14522: 2006. Táto norma popisuje postup pri určovaní teploty vznietenia výbušných zmesí

horľavých plynov a pár so vzduchom. Teplota vznietenia sa stanoví zavedením skúšanej vzorky do vnútorného priestoru banky zahriatej na určitú teplotu elektrickou pecou pre rovnomerné ohrievanie. Meria sa teplota a pozoruje sa, kedy sa objaví plameň a/alebo výbuch. Teplota vznietenia je najnižšia teplota banky, pri ktorej nastane vznietenie vzorky.



Obrázok 29 Prístroj na určovanie teploty vznietenia (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.2.3 Stanovenie teploty vzplanutia alebo vznietenia u tuhých látok

Pre stanovenie teploty vzplanutia a vznietenia pevných látok sa využíva najmä skúšobný postup podľa STN ISO 871: 2010. Pri jeho aplikácii sa vzorka materiálu zahrieva v teplovzdušnej peci pri rôznych teplotách v zahrievacej komore a teplota vzplanutia sa stanoví priložením malého zapalovacieho plameňa smerovaného na otvor krytu pece, aby sa zapálili uvoľnené plyny. Teplota vznietenia sa stanoví rovnakým spôsobom ako teplota vzplanutia, ale bez zapalovacieho plameňa.



Obrázok 30 Prístroj na stanovenie teploty vzplanutia a teploty vznietenia (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.2.4 Stanovenie náchylnosti materiálov na samovznietenie

Na stanovenie sklonu k samozahrievaniu a samovznieteniu olejov, náterových hmôt, tukov a mastiacich a čistiacich prostriedkov sa používa Mackeyov test. Pri skúške sa simulujú ideálne



podmienky pre samovznietenie. Nosičom pre skúšanú látku je čistá bavlnená vata, ktorá sa napustí skúšanou látkou a zahrieva sa po stanovený čas v Mackeyovom prístroji. V priebehu skúšky je zabezpečený kontinuálny prívod vzduchu k skúšanej vzorke a pomocou termočlánku alebo teplomera sa sleduje nárast teploty bavlnenej vaty napustenej skúšanou látkou v závislosti od času. Podľa priebehu teploty sa potom posudzuje sklon k samovznieteniu. Skúška sa odporúča vo väčšine prípadov vykonávať dlhší čas, a to až tri hodiny.



Obrázok 31 Prístroj Mackey (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.2.5 Stanovenie spaľovacieho/spalného tepla

Skúšobný postup v zmysle platnej normy EN ISO 1716: 2010-12 sa používa pre pevné látky a je založený na stanovení spaľovacieho/spalného tepla pri konštantnom objeme v kalorimetrickej nádobe (bombe). Spaľovacie/spalné teplo je definované ako množstvo tepla, ktoré sa uvoľní pri dokonalom spálení látky, pričom voda v spalinách je v kvapalnej forme.

Z hodnôt spaľovacieho/spalného tepla je následne možné odvodiť ďalšiu požiarotechnickú charakteristiku, ktorou je výhrevnosť. Výhrevnosť je definovaná ako množstvo tepla, ktoré sa uvoľní pri dokonalom spálení látky, pričom voda v spalinách je vo forme pary. Výhrevnosť sa matematicky rovná spaľovaciemu/spalnému teplu zmenšenému o súčin vzniknutého množstva vody a výparného tepla vody.

Počas skúšky dôjde k spáleniu zmesi 0,5 g vzorky a 0,5 g kyseliny benzoovej v skúšobnom téglíku (téglíková metóda) alebo v cigaretovom papieri (cigaretová metóda), ktoré sú umiestnené v kalorimetrickej bombe. Kalorimetrická bomba je pred skúškou naplnená čistým kyslíkom s tlakom 3 až 3,5 MPa (termín čistý kyslík nie je celkom presný, nakoľko sa v kalorimetrickej bombe pred plnením nachádza vzduch s atmosférickým tlakom, do ktorého sa natlačí čistý kyslík na výsledný tlak 3 až 3,5 MPa).

Spaľovacie/spalné teplo sa vypočíta na základe zmeraného nárastu teploty destilovanej alebo demineralizovanej vody v kalorimetrickej nádobe po spálení vzorky známeho

spaľovacieho/spalného tepla paliva použitého na zapálenie vzorky a známej výmeny tepla medzi kalorimetrickou nádobou a okolím.

Pri kvapalných látkach sa postupuje v zmysle STN ISO 1928: 2003-07. Skúška sa zakladá na úplnom spálení vzorky v kalorimetrickej tlakovej nádobe v prostredí stlačeného kyslíka nasýteného vodnou parou. Zmeria sa množstvo tepla, ktoré sa uvoľní pri spálení paliva a pomocných látok, pri vzniku vodných roztokov  $\text{HNO}_3$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  v podmienkach skúšky a vypočíta sa spaľovacie/spalné teplo vzorky.



Obrázok 34 Kalorimetrická tlaková nádoba (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.2.6 Stanovenie medzí výbušnosti

Medze výbušnosti sa stanovujú ako pre kvapalné a plynné, tak i tuhé látky.

Na stanovenie medze výbušnosti sa pre kvapalné a plynné látky využíva štandardný skúšobný postup podľa ASTM E681-09: 2015 pre koncentračné medze horľavosti chemikálií. Skúšobná metóda stanovuje dolnú a hornú medzu výbušnosti chemikálií, ktoré majú dostatočný tlak pár na vytvorenie horľavej alebo výbušnej zmesi so vzduchom. Homogénna zmes plynu alebo pary so vzduchom je iniciovaná v uzatvorenej nádobe vysokonapäťovým výbojom medzi elektródami a pozoruje sa šírenie plameňa až po výbuch. Zariadenie je obmedzené hornou hranicou teploty  $150^\circ\text{C}$ .



Obrázok 32 Prístroj na určovanie medzí výbušnosti (PTEÚ MV SR 2014)

Na stanovenie dolnej medze výbušnosti prachov sa využíva výbuchová komora. Dolná medza výbušnosti prachu je taká koncentrácia prachu vo vzduchu, ktorú je možné danou iniciačnou energiou zapáliť, pričom plameň má tendenciu rozširovať sa.

Na stanovenie sa používa vzorka s časticami menšími než 0,063 mm, prípadne iná, vždy s uvedením veľkosti frakcie sitovej analýzy. Do rozvírovača sa nasype odvážená vzorka. Podľa tabuľky rozvírovacích podmienok sa nastaví stupeň rozvírovania a oneskorenie iniciácie. Medzi elektródy sa pripevní iniciačný zdroj. Voľná stena komory sa prekryje papierovou membránou, ktorá sa upevní dvierkami. Membrána sa na dolnom okraji prereže (aby v komore nevznikal pretlak privedením vzduchu) a komora sa prisunie ku murovanému boxu.

Vynuluje sa „mV-meter“ a zariadenie a zásobník rozvírovacieho vzduchu sa natlakuje podľa tabuľky podmienok. Zatlačením štartovacieho tlačidla sa privedie do rozvírovača nastavené množstvo rozvírovacieho vzduchu, tým dôjde k rozvíreniu vzorky a po uplynutí nastaveného času oneskorenia iniciácie automaticky dôjde k zapáleniu iniciačného zdroja. Pritom sa vizuálne sleduje veľkosť plameňa v komore. Po dosiahnutí maximálnej hodnoty napätia sa táto odpočíta na mV-metri a vynesie do grafu pre skúšanú koncentráciu. Potom sa komora vyčistí tlakovým vzduchom od zvyškov prachu.

Ďalšie skúšky sa vykonávajú pri zmenenej koncentrácii prachu tak, aby nameranými bodmi zakreslenými v grafe bolo možné preložiť krivku. Z krivky sa odčíta koncentrácia zodpovedajúca napätiu 1,5 mV, čo je hľadaná hodnota dolnej medze výbušnosti.

V prípade väčšieho rozptylu nameraných hodnôt pre jednotlivé koncentrácie prachu sa skúšky aj viackrát opakujú, aby sa dala nameranými bodmi preložiť krivka čo najpresnejšie. Toto platí

obzvlášť pre vzorky obsahujúce väčšie častice alebo pre vzorky ťažko rozvíriteľné – lepkavé a pod.). Ak nie je nameraná hodnota 1,5 mV do koncentrácie prachu  $630 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , prach je nevybušný. Dolná hranica výbušnosti sa stanovuje pri energii iniciácie 9 kJ a 4,5 kJ. Pri vzorkách majúcich dolnú hranicu výbušnosti menšiu ako  $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  sa stanovuje dolná medza výbušnosti tiež pri energii iniciácie  $E_i = 0,1 \text{ kJ}$ .

Okrem už spomenutej metódy je možné pre prachové častice aplikovať aj skúšobný postup podľa ČSN EN 14034-3+A1: 2011 Stanovenie výbuchových charakteristík rozvíreného prachu. Časť 3: Stanovenie dolnej medze výbušnosti LEL rozvíreného prachu. Táto norma opisuje skúšobnú metódu stanovenia dolnej medze výbušnosti rozvíreného prachu v uzavretej nádobe za definovaných počiatkových podmienok tlaku a teploty. Skúšobný postup sa realizuje vo výbuchovom autokláve. Okrem prachov je možné týmto postupom testovať aj plyny a hybridné zmesi.

### **3.2.7 Stanovenie horľavosti metódou kyslíkového čísla**

Pre stanovenie horľavosti metódou kyslíkového čísla sa využíva skúšobný postup v zmysle normy STN EN ISO 4589-2: 2001: Plasty. Ide o metódu stanovenia minimálnej koncentrácie kyslíka v zmesi, ktorá je ešte schopná udržať horenie malých skúšobných telies vo vertikálnej polohe za predpísaných podmienok skúšky.

Pri skúške sa skúšobné telesá pripravujú postupom vyhovujúcim špecifikácii materiálov. Odoberie sa vzorka dostatočne veľká pre prípravu najmenej 15 skúšobných telies. V skúšobnom zariadení sa udržiava teplota v tolerancii  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zvolí sa počiatková koncentrácia kyslíka. Skúšobné teleso sa upevní vertikálne do stredu skúšobnej trubice tak, aby jeho vrchol bol najmenej 100 mm pod horným otvorom a jeho najnižšia exponovaná časť bola najmenej 100 mm nad vrcholom zariadenia k rozptýleniu plynu na dne trubice. Nastaví sa zmes plynov a prietok sa zriedi tak, aby zmes kyslík/dusík s požadovanou koncentráciou kyslíka pretekala trubicou. Následne dôjde k zapáleniu vzorky. Pri skúške je možné použiť dve metódy zapalovania: zapalovanie na hornom povrchu alebo zapalovanie na hornom povrchu a čiastočne i na vertikálnych plochách skúšobného telesa.

Plameň sa prikladá po dobu najviac 30 s, s krátkymi prestávkami v intervale každých 5 s.

Pri prvej metóde sa teleso považuje za zapálené a meranie doby a rozsahu horenia možno začať ak po oddialení horáka po 5 s celá jeho horná časť horí. Pri druhej metóde sa teleso považuje

za zapálenie a meranie doby a rozsahu horenia možno zahájiť akonáhle niektorá z častí plameňa dosiahne hornú referenčnú značku.

V priebehu skúšok sa pri hodnotení ďalšieho telesa mení koncentrácia kyslíka v závislosti od hodnôt nameraných pri predchádzajúcom skúšobnom telese.

Kyslíkové číslo vyjadrené v objemových percentách sa vypočíta ako súčet konečnej hodnoty kyslíka (obj. %) s hodnotou súčinu rozdielu medzi koncentraciami kyslíka (%) a faktorom  $k$  získaným zo spomínanej normy.

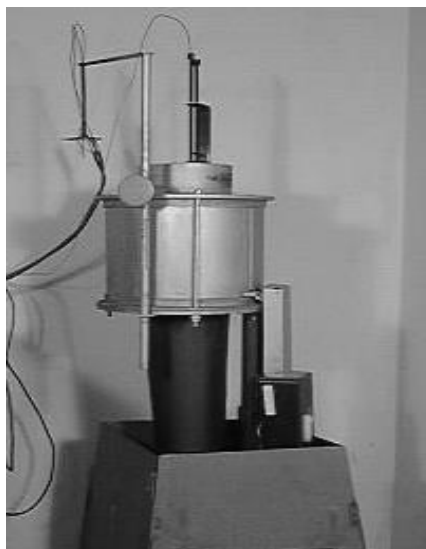
Osvald et al. (2009) vo svojej publikácii uvádzajú, že výsledky kyslíkového čísla nesmú byť použité pre hodnotenie požiarnej bezpečnosti určitého materiálu alebo výrobku za podmienok skutočného požiaru. Využiť je ich možné len čiastočne pri hodnotení požiarneho rizika, kedy sa berú do úvahy všetky faktory týkajúce sa hodnotenia požiarneho nebezpečenstva pri určitej aplikácii materiálu.

### **3.2.8 Stanovenie nehorľavosti stavebných výrobkov**

Pre stanovenie nehorľavosti stavebných výrobkov sa v praxi používa skúšobný postup podľa STN EN ISO 1182: 2010. Pri jeho aplikácii sa vzorka materiálu po dobu 30 alebo 60 minút zahrieva v peci pri teplote 750°C, pričom sa registrujú teploty na povrchu a vo vnútri vzorky. Zaznamenáva sa čas horenia vzorky. Po skúške sa musí určiť hmotnostný úbytok každej vzorky, rozdiel maximálnej teploty pece a ustálenej teploty pece, rozdiel maximálnej teploty na povrchu vzorky a ustálenej teploty pece, čas trvania horenia vzorky.

Pred samotnou skúškou sa nechá pec počas minimálne 10 minút stabilizovať na teplote  $(750 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Počas tejto doby nesmie byť drift (lineárna regresia) väčší ako  $2 ^\circ\text{C}$  a maximálna odchýlka od priemernej teploty nesmie byť väčšia ako  $10 ^\circ\text{C}$ .

Samotné skúšobné zariadenie je znázornené na obrázku 33.



Obrázok 33 Zariadenie na stanovenie nehorľavosti stavebných výrobkov (PTEÚ MV SR 2014)

### 3.3 Skúšky požiarnej odolnosti konštrukcií

Cieľom jednotlivých skúšok zameraných na testovanie požiarnej odolnosti stavebných konštrukcií je určiť harmonizovaný postup klasifikácie požiarnej odolnosti stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Táto klasifikácia sa vykonáva na základe výsledkov týchto skúšobných postupov.

Kľúčovou normou v oblasti testovania požiarnej odolnosti je norma STN EN 1363-1: 2013 Skúšanie požiarnej odolnosti. V tejto európskej norme sa určujú základné princípy zisťovania požiarnej odolnosti rozličných konštrukčných prvkov pri vystavení normovým podmienkam namáhania požiarom.

V praxi sa využíva, okrem už spomenutej metódy testovania v zmysle normy STN EN 1363-1: 2013, niekoľko ďalších štandardizovaných skúšobných metód, ktorých vhodnosť aplikácie je závislá od typu konštrukčného prvku. Hodnotenú a klasifikované sú nasledovné typy konštrukčných prvkov: nosné prvky bez požiarnej deliacej funkcie (steny, stropy, strechy, nosníky, stĺpy, balkóny, pavlače, schodišťa), nosné prvky s požiarou deliacou funkciou so zasklením, prevádzkovými zariadeniami a príslušenstvom alebo bez nich (steny, stropy, strechy, zvýšené podlahy), výrobky a systémy na ochranu prvkov alebo častí konštrukcií (podhl'ady bez nezávislej požiarnej odolnosti, protipožiarne ochranné nátery, obklady a clony), nenosné prvky alebo časti konštrukcií so zasklením, prevádzkovými zariadeniami a príslušenstvom alebo bez nich (priečky, fasády a vonkajšie steny, podhl'ady s nezávislou požiarou odolnosťou, požiarne dvere a uzávery a pod.), obklady stien a podhl'adov so schopnosťou protipožiarnej ochrany a výt'ahové šachtové dvere.

Podrobný popis postupov jednotlivých skúšobných metód v zmysle príslušných noriem je uvedený v publikácii Osvald et al. (2009).

### **3.4 Skúšky rýchlosti šírenia plameňa**

Rýchlosť šírenia plameňa po povrchu materiálu charakterizuje jeho správanie sa od okamihu iniciácie po fázu požiaru flashover (celkové priestorové vzplanutie). Vo fáze post flashover (plne rozvinutý požiar) údaj o rýchlosti šírenia plameňa má už len minimálnu výpovednú hodnotu. Výpovedná hodnota väčšiny skúšobných metód hodnotiacich rýchlosť šírenia plameňa po povrchu materiálu klesá s narastajúcou dobou rozvoja požiaru. Vo fáze rozvíjajúceho sa požiaru (aj pred dosiahnutím fázy flashover) vykazuje väčšina materiálov vyššiu rýchlosť šírenia plameňa ako hodnotu, ktorá bola stanovená väčšinou skúšobných metód. Príčinou je tepelná radiácia zo stropu (Martinka 2015).

Základné rozdelenie rýchlosti šírenia plameňa je podľa orientácie vzorky a smeru šírenia na vertikálnu a horizontálnu. Sofistikovanejšie skúšobné metódy umožňujú meranie rýchlosti šírenia plameňa nielen pre uvedené dve krajné orientácie, ale dokážu merať závislosť rýchlosti šírenia plameňa od sklonu vzorky (sklon sa hodnotí v stupňoch od horizontálnej roviny).

Podľa Martinku (2015) je rýchlosť šírenia plameňa po povrchu materiálu možné posúdiť aj na základe vybraných skúšok potrebných pre klasifikáciu stavebného výrobku do triedy reakcie na oheň (napr. skúška správania sa výrobku počas jeho vystavenia osamelu horiacemu predmetu podľa STN EN 13823: 2015, skúška správania sa výrobku počas jeho vystavenia malému plameňu podľa STN EN ISO 11925-2: 2011, z hľadiska rýchlosti šírenia sa plameňa po povrchu materiálu má najvyššiu výpovednú hodnotu skúška správania sa podlahových krytín pri horení použitím zdroja sálavého tepla podľa STN EN ISO 9239-1: 2011).

Rýchlosť šírenia sa plameňa po povrchu káblov je možné vyhodnotiť z výsledkov vertikálneho šírenia plameňa pre vodiče alebo káble s jednou izoláciou podľa STN EN 60332-1-2: 2005 a skúšky uvoľneného tepla a dymu na kábloch počas skúšky šírenia plameňa podľa STN EN 50399: 2017.

Okrem popísaných metód, ktoré sa používajú pri klasifikácii triedy reakcie na oheň stavebných materiálov a ktoré umožňujú okrem iného aj stanovenie rýchlosti šírenia plameňa po povrchu, existuje vo svete pomerne veľké množstvo skúšobných metód primárne zameraných na stanovenie rýchlosti šírenia plameňa po povrchu.

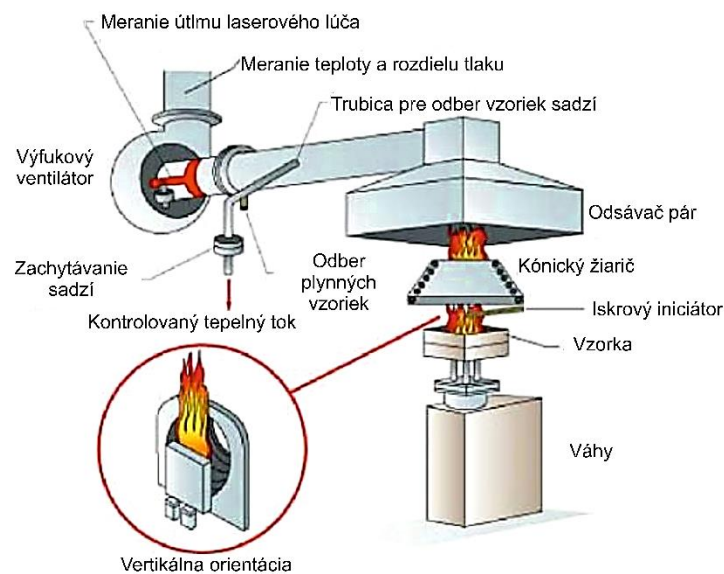
Martinka (2015) uvádza, že najpoužívanejšou skúšobnou metódou na stanovenie rýchlosti šírenia plameňa po povrchu materiálu je test zapálenia a bočného šírenia plameňa (LIFT - Lateral Ignition and Flame Spread Test). Táto skúška je zakotvená vo viacerých technických normách (ISO 5658-1: 2006, ISO 5658-2: 2006 a ASTM E1321-13).

Výsledky testu zapálenia a bočného šírenia plameňa sú údaje, na základe ktorých je možné urobiť spoľahlivú predikciu šírenia sa plameňa za reálnych podmienok (Cleary, Quintiere 1991).

### 3.5 Skúšky rýchlosti uvoľňovania tepla

Rýchlosť uvoľňovania tepla sa považuje za základný parameter skúšaného materiálu, ktorý vyjadruje jeho príspevok k rozvoju požiaru, ktorému je vystavený. Základnou jednotkou pre vyjadrenie rýchlosti uvoľňovania tepla z materiálu je  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Pre stanovenie rýchlosti uvoľňovania tepla (HRR) sa využíva metóda kónického kalorimetra (obrázok 34) v zmysle ISO 5660-1: 2002 a ISO 5660-2: 2002.



Obrázok 34 Schéma súčastí kónického kalorimetra (www.nist.gov)

Pri skúške je vzorka s rozmermi 100 x 100 mm a hrúbkou od 6 do 50 mm zaťažená tepelnou radiáciou z kónického žiariča s hustotou tepelného toku od 0 do  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Na iniciáciu rozkladných produktov sa používa iskrový iniciátor. Počas skúšky sa kontinuálne meria hmotnosť vzorky.



Vznikajúce sploďiny horenia sú odvádzané cez odsávací digestor do potrubia, kde sú analyzované. Zo spotreby kyslíka sa počíta rýchlosť uvoľňovania tepla a celkové uvoľnené teplo. Rýchlosť uvoľňovania tepla sa počíta na základe poznatku, že pri horení väčšiny organických polymérov sa na 1 g spotrebovaného kyslíka uvoľní  $(13,1 \pm 0,7)$  kJ tepla (Lyon 2004).

Okrem koncentrácie kyslíka sa v sploďinách horenia štandardne meria aj koncentrácia oxidu uhoľnatého, oxidu uhličitého a optická priepustnosť svetla pre laserový lúč. Z údajov o koncentrácii oxidu uhoľnatého a prietoku sploďín horenia sa počíta celkové množstvo uvoľneného oxidu uhoľnatého. Z údajov o útlme laserového lúča, jeho dĺžky a času trvania skúšky je možné vypočítať rýchlosť tvorby dymu a jeho celkové uvoľnené množstvo. Ďalej je možné zachytávať sadze na vlákňový filter a na základe gravimetrickej metódy (na základe celkového prietoku sploďín horenia, prietoku odsávanej vzorky sploďín horenia cez filter, času trvania skúšky a rozdielu hmotnosti filtra pred skúškou a po skúške) stanoviť množstvo vznikajúcich sadzí. Z údajov o uvoľnenom teple a úbytku hmotnosti vzorky sa počíta výhrevnosť (výhrevnosť vo význame effective heat of combustion). Z údajov o celkovom množstve uvoľneného oxidu uhoľnatého a celkovom úbytku hmotnosti vzorky a celkovom uvoľnenom teple sa počíta výťažok oxidu uhoľnatého na jednotku úbytku hmotnosti vzorky a na jednotku uvoľneného tepla. (Martinka 2015)

### **3.6 Skúšky zamerané na posúdenie sklonu materiálu šíriť požiar vo fáze flashover**

Pre účely posúdenia sklonu materiálu šíriť požiar vo fáze flashover sa používa jediná štandardizovaná metóda, ktorú je skúška podľa ISO 9705: 1993. Táto bola naposledy revidovaná v roku 2016 (ISO 9705-1: 2016).

Na základe výsledkov tejto skúšky sa materiály klasifikujú do jednej zo štyroch kategórií: FO-1 (flashover počas skúšky nenastane), FO-2 (flashover nastane v časovom intervale od 600 do 1200 s), FO-3 (flashover nastane v časovom intervale od 120 do 600 s) a FO-4 (flashover nastane v časovom intervale do 120 s od začiatku skúšky).

Skúška podľa ISO 9705: 1993 je navrhnutá tak, aby umožnila posúdenie správania sa vnútorných obkladových materiálov za najnepriaznivejších podmienok.

Predikcia správania sa materiálu za podmienok skúšky podľa ISO 9705: 1993 však môže byť urobená nielen na základe triedy reakcie na oheň, ale aj na základe výsledkov skúšok na

kónickom kalorimetri, skúšobným postupom podľa ISO 5660-1: 2002 pri zaťažení vzorky tepelným tokom s hustotou  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Na uvedenú predikciu sa vo svete používa viac metód.

Podľa Martinku (2015) je jednou z najspoľahlivejších a v súčasnosti najpoužívanějších metód podľa Kokkalu et al. (1993). Táto metóda bola implementovaná do viacerých zahraničných technických noriem a predpisov. Príkladom implementácie je verifikačná metóda C/VM2: 2013, kde je pre použitie materiálu v únikových cestách predpísaná jeho flashover kategória stanovená v zmysle citovanej metódy.

Podstatou Kokkalovej a kol. (1993) metódy je výpočet indexu iniciácie podľa rovnice [64] a indexu rýchlosti uvoľňovania tepla podľa rovnice [65],

$$I_{IG} = \frac{1}{t_i} \quad [64]$$

kde  $I_{IG}$  je index iniciácie ( $\text{min}^{-1}$ ),  $t_i$  je čas iniciácie (min), t.j. čas, v ktorom rýchlosť uvoľňovania tepla zo vzorky prvýkrát dosiahne hodnotu  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,

$$I_Q = \int_{t_i}^{t_{end}} \left[ \frac{HRR(t)}{(t-t_i)^m} \right] dt \quad [65]$$

kde  $I_Q$  je index rýchlosti uvoľňovania tepla (-),  $HRR(t)$  je okamžitá rýchlosť uvoľňovania tepla v čase  $t$  ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $t$  je čas (s),  $m$  je empirická konštanta (pri výpočte sa dosadzujú dve hodnoty 0,34 a 0,93) (-).

Čas do dosiahnutia etapy flashover sa počíta z nerovnic [66 až 69]. V prípade platnosti nerovnice [66] je materiál klasifikovaný do kategórie FO-4, ak platí nerovnica [67] do kategórie FO-3, pri platnosti nerovnice [68] do kategórie FO-2 a v prípade platnosti nerovnice [69] do kategórie FO-1. Ak počas celého času trvania skúšky nedosiahne rýchlosť uvoľňovania tepla hodnotu  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , klasifikuje sa materiál do kategórie FO-1 (C/VM2:2013).

$$I_{Q(m=0,34)} > 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} > 2475 - 165 \cdot I_{IG} \quad [66]$$

$$I_{Q(m=0,34)} > 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} \leq 2475 - 165 \cdot I_{IG} \quad [67]$$

$$I_{Q(m=0,34)} \leq 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} > 1650 - 165 \cdot I_{IG} \quad [68]$$

$$I_{Q(m=0,34)} \leq 6800 - 540 \cdot I_{IG} \wedge I_{Q(m=0,93)} \leq 1650 - 165 \cdot I_{IG} \quad [69]$$

\*  $\wedge$  - a zároveň

### **3.7 Chemicko-analytické metódy zisťovania zloženia materiálov, toxicity spodín horenia a optickej hustoty dymu**

Poznanie chemického zloženia posudzovaných materiálov je základným predpokladom pre pochopenie správania sa týchto materiálov pri požiari, ich príspevku k rozvoju požiaru ako aj pre tvorbu dymu a jeho následné riadenie.

Pre identifikáciu chemického zloženia posudzovaných materiálov, analýzu toxicity spodín horenia vznikajúcich pri požiari, ale aj samotné stanovenie optickej hustoty dymu, sa v súčasnosti využívajú viaceré progresívne chemicko-analytické metódy, ako napr. diferenciálna termická analýza a termická degradácia látok, infračervená spektroskopia, UV/VIS absorpčná spektroskopia, Ramanova spektroskopia, hmotnostná spektroskopia, plynová a kvapalinová chromatografia a röntgenová difraktografia.

#### **3.7.1 Infračervená spektroskopia (IR/FTIR)**

Podobne ako farebné zlúčeniny pohlcujú časť svetelného žiarenia vo viditeľnej oblasti, všetky organické zlúčeniny pohlcujú žiarenie aj v infračervenej oblasti, teda žiarenie s vlnovou dĺžkou väčšou než 800 nm. Za pohlcovanie žiarenia zodpovedajú jednotlivé väzby, ktorých vibrácie prechádzajú do stavov s vyššou energiou. Frekvencia pohlcujúceho žiarenia sa vyjadruje v  $\text{cm}^{-1}$  a bežné väzby v organických zlúčeninách absorbujú v rozsahu 500 - 5000  $\text{cm}^{-1}$ , čo zodpovedá strednej až ďalekej infračervenej oblasti. Grafický záznam závislosti absorpcie od frekvencie sa skrátene volá infračervené spektrum a získa sa na prístrojoch – infračervených spektrofotometroch. IR spektrum sa nameria z látky, ktorá môže byť rozpustená v rozpúšťadle, ktoré slabo absorbuje v IR oblasti (chloroform, tetrachlórmetán), prípadne suspenzia z látky vytvorí tenký film, alebo sa látka zmieša s bromidom draselným a z tejto zmesi sa vylisuje priehľadná tableta. Infračervenou spektroskopiou sa v zlúčenine určujú niektoré charakteristické väzby, najmä násobné a zvlášť väzby C=O, C=N a C=X=Y. Existujú katalógy IR spektier, podľa ktorých sa dajú určiť známe látky.



Obrázok 35 Infračervený spektroskop (TÚPO 2014)

Pri infračervenej spektroskopii s Fourierovou transformáciou (FTIR) sa získaný signál pretransformuje na infračervené spektrum matematickou operáciou – Fourierovou transformáciou. Významne sa tak zvyšuje citlivosť, vlnočtová presnosť, rýchlosť merania a možnosti rozlíšenia. Metóda FTIR je založená na spojení interferometra, najčastejšie Michelsonovho typu s citlivým infračerveným detektorom a počítačom.

Spomedzi hlavných výhod FTIR možno spomenúť veľkú rozlišovaciu schopnosť, veľkú vlnočtovú správnosť, veľkú rýchlosť záznamu a výpočtu, skutočnosť, že spektrá je možno merať v širokom rozsahu vlnových dĺžok a možnosti počítačového spracovania spektier.

Kombinácia infračervenej spektroskopie s Fourierovou transformáciou a plynovej chromatografie predstavuje spojenie dvoch analyticky veľmi účinných metód – spektroskopickú metódu, ktorá je schopná poskytnúť jedinečné informácie o identite a kvantite látky a pomerne univerzálnej separačnej metódy (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

### **3.7.2 UV/VIS absorpčná spektroskopia**

Mnohé zlúčeniny, a to najmä organické, absorbujú žiarenie v ultrafialovej a viditeľnej oblasti spektra s vlnovými dĺžkami 180 až 800 nm. Ultrafialové (UV) a viditeľné (VIS) spektrá sa nazývajú elektrónové spektrá, pretože pri absorpcii žiarenia skúmanou látkou dochádza k redistribúcii elektrónov v molekule.

V menšej miere ovplyvňujú elektrónové spektrum aj vibračné a rotačné zmeny molekúl. Čím je sila priťahujúca elektróny väčšia, tým väčšia energia je potrebná na to, aby sa dostali zo svojich hladín. Pri odčerpaní príslušnej energie žiarenia sa elektróny rozkmitajú a prijatú energiu dodávajú okolitým časticiam. V konečnej fáze sa prijatá energia mení na teplo.

Spektrometricky sa stanovujú látky, ktoré buď samé absorbujú v UV alebo VIS oblasti spektra alebo tie, ktoré sa kvantitatívne dajú derivatizovať na komplexy s vysokým mólovým absorpčným koeficientom pri niektorej vlnovej dĺžke v tejto oblasti. Tento spôsob sa využíva najmä pri určovaní nízkych koncentrácií neabsorbujúcich látok.

Absorpčná spektrálna analýza v UV a VIS oblasti spektra využíva najmä oblasť od 200 do 800 nm. Oblasť s vlnovými dĺžkami 400 až 800 nm je viditeľná oblasť, vnímaná ľudským okom. Blízka ultrafialová oblasť (200 – 400 nm) sa často využíva na analýzu zlúčenín, ktoré neabsorbujú žiarenie v oblasti VIS. Ďaleká ultrafialová oblasť (100 – 200 nm) sa nazýva aj vákuová, pretože absorpcia predovšetkým atmosferického kyslíka musí byť odstraňovaná pomocou vákuovania meracieho systému (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

Praktickú aplikáciu UV a VIS spektroskopie možno rozdeliť na kvantitatívnu a kvalitatívnu analýzu.

Pri kvantitatívnej analýze je stanovenie koncentrácie absorpčnou spektrofotometriou založené na Lambertovom – Beerovom zákone, z ktorého vyplýva určenie koncentrácie.

Kvalitatívna analýza vychádza z vyhodnocovania absorpčných spektier ( $\lambda_{\max}$  a  $\varepsilon_{\max}$ ). Doterajšie systematické meranie absorpčných elektrónových spektier čistých látok poskytlo rozsiahly materiál pre vybudovanie údajovej bázy o absorpčných pásoch rôznych chromofórov, o vplyve substituentov, rozpúšťadiel a pod. Na základe nameraných hodnôt absorpčných pásov chromoforov je možné určiť prítomnosť skupín v molekule, čím sa získajú informácie o type analyzovanej zlúčeniny.

Ďalšia možnosť je využiť spektrá pri identifikácii neznámej látky vo vzorke. Na konečnú identifikáciu zlúčeniny sa používa porovnávací metóda spektra vzorky so spektrom čistej látky alebo z tzv. atlasu spektier.

Veľkou výhodou spektrofotometrie je, že na meranie spektra sa používa minimálne množstvo analyzovanej látky, ktorá sa po odparení rozpúšťadla získava v pôvodnom stave a je možné ju použiť na ďalšie analýzy.

### **3.7.3 Ramanova spektroskopia**

Ramanova spektroskopia je spektroskopická metóda analytickej chémie, ktorá patrí medzi metódy elektromagnetickej spektroskopie. Táto metóda využíva Ramanov jav. V analýze sa

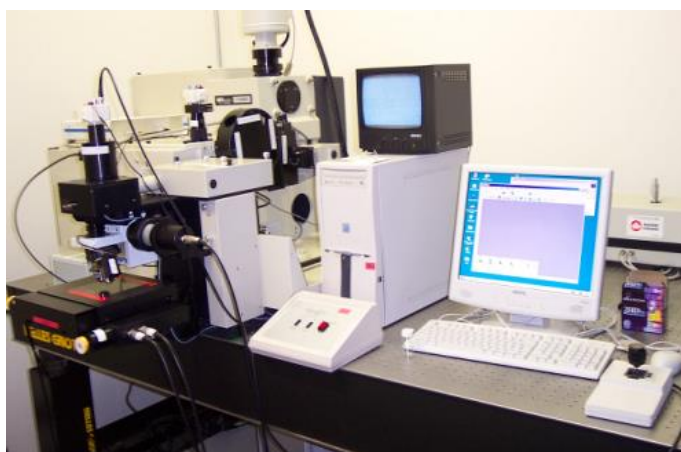
používa rozptyl laserového lúča. Laserový lúč môže s elektrónmi interagovať v zásade tromi spôsobmi:

- Najčastejšie laserový lúč excituje elektrón v základnom stave do vzbuđeného stavu a pri návrate zo vzbuđeného stavu späť sa vyžiari fotón s rovnakou vlnovou dĺžkou, akú mal pôvodný fotón – tzv. Rayleighov rozptyl, ktorý nenesie žiadnu analytickú informáciu.
- Pokiaľ sa elektrón po excitácii do vzbuđeného stavu vráti do vyššej kvantovej hladiny, než z ktorej bol elektrón vyrazený, vyžiari sa fotón s väčšou vlnovou dĺžkou – tzv. Stokesove fotóny.
- Naopak, keď sa elektrón pôvodne nenachádzal v základnom stave, ale na vyššej hladine a vracia sa na základnú hladinu, vyžiari sa fotón s menšou vlnovou dĺžkou – tzv. anti-Stokesove fotóny.

Posuny frekvencií u Stokesových a anti-Stokesových fotónov od frekvencie použitého laserového zdroja potom nesú analytickú informáciu o rozdieloch jednotlivých kvantových hladín (najčastejšie vibračných).

Ramanova spektroskopia je do značnej miery doplnkovou metódou k infračervenej spektroskopii. Je skoro pravidlom, že pásy intenzívne v Ramanových spektrách sú v infračervených spektrách slabé a naopak.

Ramanova spektroskopia sa v požiarinej chémii uplatňuje najmä pri analýze farieb a vlákien.



Obrázok 36 Ramanov spektroskop (TÚPO 2014)

### 3.7.4 Hmotnostná spektroskopia (MS)

Táto metóda identifikácie je založená na vytvorení kladne nabitých častíc – katiónov z molekúl analyzovanej látky, ktoré sa následne v magnetickom poli usporiadajú podľa pomeru hmotnosti

k elektrickému náboju ( $m/z$ ). Záznam množstva častíc voči pomeru  $m/z$  je hmotnostné spektrum. Získava sa v hmotnostných spektrografoch, ktoré tvoria obyčajne jeden celok s plynovým chromatografom. Ide o to, aby sa analyzovala čistá látka, teda zmes po prejení chromatografickou kolónou sa rozdelí na zložky, ktoré sa ionizujú a detegujú. Parametre pri ionizácii sa volia tak, aby ióny mali jednotkový kladný náboj a potom sa na zázname dajú odčítať priamo molekulové hmotnosti jednotlivých fragmentov. Látka sa totiž pri ionizácii rozpadá na množstvo menších častí – fragmentov. Niektoré sú charakteristické pre určité typy zlúčenín. Signál v hmotnostnom spektre s najvyššou hmotnosťou zodpovedá molekulovému iónu a podľa neho sa dá určiť molekulová hmotnosť látky. Hmotnostné spektrometre s vysokou rozlišovacou schopnosťou umožňujú priamo určiť aj konkrétny molekulový vzorec neznámej látky. Bežné usporiadanie molekulovej spektroskopie si vyžaduje, aby sa látka nerozkladala pri vyšších teplotách používaných v plynovej chromatografii, čo platí pre látky s molekulovou hmotnosťou menšou než  $500 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Na identifikáciu väčších molekúl sa používajú novšie techniky (ion spray) a takto sa dajú určiť molekulové hmotnosti až 1-2 rády vyššie.

Hmotnostná spektrometria sa najčastejšie využíva na kvalitatívnu analýzu – umožňuje určiť presnú molekulovú hmotnosť jednotlivých zlúčenín a ich štruktúru. Z hľadiska analýzy viaczložkových sústav sa za veľmi významné považuje spojenie MS s plynovou, resp. kvapalinovou chromatografiou (GC/MS, LC/MS).

Získané výsledky je možné využiť na určenie štruktúry zložiek materiálov a pri sledovaní toxických látok unikajúcich do prostredia pri ich horení.

### **3.7.5 Termická analýza**

Termická analýza predstavuje súbor metód, ktorými sa študuje zmena stavu skúmaného materiálu na základe merania niektorej z jeho fyzikálnych vlastností ako funkcie teploty, pričom teplota sa mení kontrolovane podľa určitého programu. Metódy termickej analýzy vo všeobecnosti umožňujú sledovať zmeny, ku ktorým dochádza pri zahrievaní alebo ochladzovaní vzorky.

Metódy termickej analýzy sa rozdeľujú na statické a dynamické. Pri statických metódach termickej analýzy sa sleduje správanie látky (materiálu) vyhrievanej na konštantnú teplotu. Pri aplikácii dynamických metód termickej analýzy je látka konštantnou rýchlosťou zahrievaná alebo ochladzovaná na predom stanovenú teplotu.

Medzi najdôležitejšie metódy termickej analýzy patria (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007): diferenčná termická analýza (DTA), termogravimetria (TG), derivačná termogravimetria (DTG) a diferenciálna snímacia kalorimetria (DSC).

Prostredníctvom diferenčnej termickej analýzy (DTA) sa zisťujú exotermické a endotermické procesy, ktoré prebiehajú pri plynulom zvyšovaní alebo znižovaní teploty vzorky a jej okolia (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007). Tieto procesy sa prejavujú náhlym vzrastom alebo poklesom teploty skúmanej vzorky v porovnaní s teplotou okolia alebo porovnávacej látky, ktorá je zahrievaná za rovnakých podmienok ako skúmaná vzorka, pričom platí, že porovnávacia látka za podmienok merania nesmie podliehať nijakým chemickým ani fázovým premenám. Na zázname DTA sa zaznamenáva zmena teploty v závislosti od času, resp. teploty prostredia či porovnávacej látky. Z tvaru a veľkosti pík na DTA krivke sa robia závery o zmenách vzorky.

Pri termogravimetrii (TG) sa zisťujú zmeny hmotnosti vzoriek v závislosti od teploty, najčastejšie pri ich programovanom ohreve. Pre účely termogravimetrickej analýzy polymérov sa využíva skúšobný postup podľa STN EN ISO 11358-1:2015-04. Na obrázku 38 je uvedený prístroj na termickú analýzu.



Obrázok 38 Prístroj na termickú analýzu (PTEÚ MV SR 2014)

Pri aplikácii termogravimetrickej, resp. i derivačnej termogravimetrickej metódy, sa skúšobná vzorka s hmotnosťou navážky od jedného do niekoľko sto miligramov zohrieva programovaným lineárnym vzostupom teploty, pričom sa zároveň zaznamenáva vzostup teploty. Počas zohrievania sa plynule sleduje hmotnosť vzorky. Výstupom z merania je tzv. TG krivka, ktorá umožňuje zistiť percentuálny úbytok hmotnosti vzorky a teploty jej rozkladu, z čoho sa usudzuje aj na chemické zmeny vzorky (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

DTG krivka je prvou deriváciou TG krivky. Umožňuje dosiahnuť väčšiu rozlišovaciu schopnosť, najmä v prípade, že zmeny hmotnosti vzorky nasledujú tesne za sebou a na TG



krivke sa prekrývajú. Píky na DTG krivke zodpovedajú teplotám pri dosiahnutí maximálnej rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

Diferenciálna snímacia kalorimetria (DSC) používa prídavný zdroj, ktorým sa vyrovnáva teplotná diferenciacia medzi rovnomerne zahrievanou vzorkou a štandardnou látkou. Meria sa pritom energia spotrebovaná na vyrovnanie teplotného rozdielu.

Využíva sa skúšobný postup podľa STN EN ISO 11357-1:2010-04 a STN ASTM E 537: 2002, pomocou ktorého sa zisťujú entalpické zmeny v materiáli, prebiehajúce pri jeho programovanom ohreve a určuje sa teplota, resp. čas, kedy k týmto zmenám dochádza.

Metódy termickej analýzy je možné využiť na kvantitatívnu i kvalitatívnu analýzu. Krivky TG, DTG, DTA, DSC sa bežne využívajú na charakterizovanie, identifikovanie a stanovenie látok anorganickej i organickej povahy, polymérov, biologických materiálov a pod.

Termogravimetria sa využíva na určenie optimálnych podmienok sušenia a žihania zrazenín v gravimetrii. Polohy píkov na krivkách termických záznamov a im zodpovedajúce teploty sú pre každú látku charakteristické, a to nielen v čistom stave, ale aj v zmesiach. Pri identifikácii sa porovnávajú TG, DTG, DTA a DSC krivky s krivkami čistých látok, získanými pri rovnakých podmienkach. Z kriviek TG, DTA, resp. DSC, možno robiť závery o fázových premenách vzoriek, ich kryštalinite, o desorpcii, chemickej stabilite a kinetike reakcií. Pre získanie jednoznačnejších výsledkov sa súčasne zaznamenávajú krivky TG, DTG, DTA a vzostup teploty súčasne s časom (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

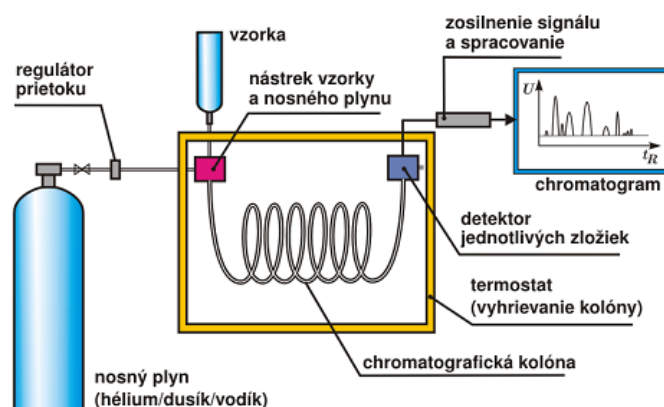
Metódy termickej analýzy možno tiež spojiť s inými analytickými technikami ako hmotnostná spektroskopia (TG/MS), infračervená spektroskopia (TG/IR) alebo plynová chromatografia (TG/GC).

### **3.7.6 Plynová chromatografia**

Chromatografia je vo všeobecnosti separačná technika, ktorá využíva delenie zložiek medzi dve fázy, z ktorých jedna je mobilná a druhá stacionárna. Pri delení dochádza k opakovanému transportu molekúl zložiek do stacionárnej fázy a opäť do fázy mobilnej (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

Plynová chromatografia je separačná metóda, ktorá využíva na separáciu plynov a pár dve heterogénne fázy. Mobilnou fázou je inertný plyn a stacionárnou fázou najčastejšie kvapalina zakotvená na inertnom nosiči, menej často povrchovo aktívny adsorbent. Je vhodná na separáciu a identifikáciu plyných a nízkoprúchich kvapalných zmesí. V klasickej plynovej

chromatografii sa na separáciu zložiek používajú kolóny naplnené vhodnou chromatografickou náplňou (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).



Obrázok 39 Schematický nákres plynového chromatografu

Medzi hlavné časti plynového chromatografu (obázok 39) patrí injektor (slúži na nástrek vzorky), regulátor prietoku (zabezpečuje konštantný prietok nosného plynu a vzorky kolónou), zásobník nosného plynu (nosný plyn tvorí mobilnú fázu, najčastejšie býva nosným plynom hélium, vodík, dusík, zriedkavejšie argón), termostat (vyhrieva kolónu a udržiava jej stálu teplotu), kolóna (samotné miesto separácie plynnej zmesi, pričom rozoznávame náplňové kolóny s dĺžkou 0,5 až 5 m, priemerom 2 až 5 mm, ktoré sú stacionárnou fázou naplnené, kapilárne kolóny s dĺžkou 10 až 100 m, priemerom 0,01 až 0,5 mm, kde stacionárna fáza tvorí len povrch kolóny, detektor pre zaznamenanie elúcie (vyplavovanie) zložiek už separovanej zmesi, vyhodnocovacie zariadenie (integrátor), ktorým je v súčasnosti väčšinou osobný počítač s príslušným softvérovým vybavením.

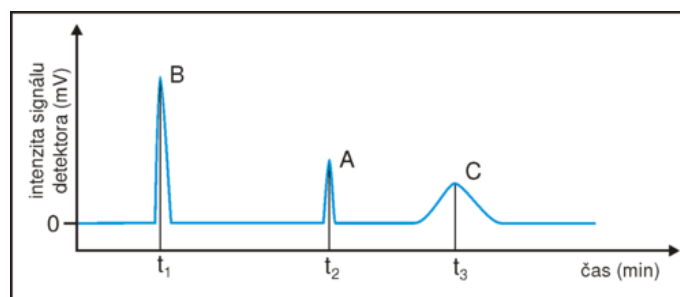


Obrázok 40 Plynový chromatograf (TÚPO 2014)

Podmienkou toho, aby sme mohli zmes rozdeliť pomocou plynovej chromatografie je, že zmes musí byť plynná resp. ľahko odpariteľná (kvapalina musí mať teplotu varu max. 200 – 250°C). Vzorka sa privádza do injektora pomocou tzv. Hamiltonovej ihly (pri kvapalných vzorkách) alebo pomocou plynovej vzorkovnice (sklenej resp. kovovej – v závislosti od tlaku). V injektore, ktorý je temperovaný, prebieha zohriatie prípadne odparenie vzorky a tá je postupne unášaná prúdom nosného plynu do kolóny. V kolóne dochádza ku samotnej separácii zložiek zmesi podľa toho, akú afinitu vykazujú tieto zložky k povrchu, resp. náplni kolóny. Prvá vychádza z kolóny zložka, ktorá má ku nej najnižšiu afinitu (zároveň má najvyššiu afinitu ku nosnému plynu). Ako posledná vychádza zložka, ktorá má k povrchu kolóny najvyššiu afinitu (má teda najnižšiu afinitu ku nosnému plynu). Výstup už rozdelených zložiek zmesi z kolóny zaznamenáva chromatografický detektor.

Detektor tvorí dôležitú súčasť každého plynového chromatografu. Jeho úlohou je detegovať už rozdelené zložky zmesi, ktoré opúšťajú kolónu. Vo všeobecnosti sa dá povedať, že detektor premieňa analytický signál (elúciu zložky) na elektrický signál (v podobe elektrického prúdu alebo elektrického napätia). Existuje viacero typov a voľba správneho detektora závisí na povahe zložiek separovanej zmesi. Medzi najpoužívanejšie patria: tepelne vodivostný detektor (TCD), plameňovoionizačný detektor (FID), detektor elektrónového záchytu (ECD), fotoionizačný detektor (PID), hélium ionizačný detektor (HID), detektor elektrolytickej vodivosti (ELCD), plameňový fotometrický detektor (FPD), detektor dusíka a fosforu (NPD), termoionizačný detektor (TID, AFID), atómovoemisný detektor (AED), hmotnostne spektrometrický detektor (MSD), detektor využívajúci infračervenú spektrometriu s Fourierovou transformáciou (FT-IR).

Z detektora vychádza elektrický signál, ktorý do žiadanej podoby spracúva vyhodnocovacie zariadenie. Výstupom vyhodnocovacieho zariadenia je graf obsahujúci tzv. píky. Poloha píku na časovej osi je mierou kvality zložky (identifikuje zložku) a plocha píku je mierou kvantity zložky v separovanej zmesi.



Obrázok 41 Vzorový chromatogram

Vzorový chromatogram z delenia trojzložkovej zmesi (zložky A, B, C). Časy  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$  sú tzv. retenčné časy zložiek a sú pre každú kolónu a zložku charakteristické. Súčet plôch všetkých troch píkov je v podstate 100 % zmesi. Plocha konkrétneho píku zložky delená plochou všetkých píkov je obsahovým zlomkom danej zložky v zmesi. Najväčšiu afinitu ku stacionárnej fáze mala zložka C, najnižšiu zložka B. Časová os reprezentuje retenčný čas.

Kačík, Geffert, Kačíková (2007) uvádzajú, že plynovú chromatografiu možno použiť na analýzu vzoriek, ktoré obsahujú prchavé a termicky stabilné látky. Vysoká separačná schopnosť plynovej chromatografie sa uplatňuje pri analýze komplikovaných zmesí.

### **3.7.7 Kvapalinová chromatografia**

Moderná kvapalinová chromatografia používa kolóny s malým priemerom častíc náplne a vysokou hustotou plnenia, ktoré vyžadujú pomerne vysoké tlaky na prácu pri optimálnej rýchlosti mobilnej fázy (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

V prípade kvapalinovej chromatografie je delená zmes rozpustená v kvapaline, ktorá preteká cez vrstvu tuhého materiálu s aktívnym povrchom – stacionárnu fázu. Ako stacionárna fáza sa používa najčastejšie silikagél, oxid hlinitý a celulóza. Podľa usporiadania stacionárnej fázy môže byť kvapalinová chromatografia tenkovrstvová alebo stĺpcová.

- **Tenkovrstvová chromatografia**

Pri tenkovrstvovej chromatografii je stacionárna fáza nanosená na pevnú platničku zo skla, plastu alebo z hliníkovej fólie a pohyb kvapaliny umožňujú kapilárne sily (vzlínanie). Špeciálny prípad tenkovrstvovej chromatografie je papierová chromatografia, kde sa delenie uskutočňuje na ploche zvlášť upraveného papiera. Praktický postup pri tenkovrstvovej chromatografii spočíva v nanosení kvapky roztoku delenej zmesi na spodnú časť platničky s tenkou vrstvou, ktorá sa potom spodným okrajom ponorí do vyvíjacej kvapaliny (eluent) a tá sa nechá vzlínaním vystúpiť k hornému okraju. Platnička sa vysuší a ak delené látky nie sú farebné, tak sa zviditeľnia pod ultrafialovým svetlom alebo reakciou s vyvolávacím činidlom. Typická hrúbka tenkej vrstvy je okolo desiatiny milimetra. Keď však chceme túto metódu využiť na získanie väčšieho množstva čistej látky (desiatky miligramov), hrúbka býva 1-3 mm. Hovoríme vtedy o preparatívnej tenkovrstvovej chromatografii.

- **Stĺpcová chromatografia**

Na preparatívnu kvapalinovú chromatografiu je vhodnejšie usporiadanie, keď stacionárna fáza tvorí stĺpec umiestnený v trubici (kolóne) a kvapalina (mobilná fáza) ňou preteká. Vhodnou

hrúbkou a dĺžkou stĺpca sa dá dosiahnuť rozdelenie zmesi v širokom intervale množstva (0,01 – 100 g). Typicky sa v laboratóriu delí okolo 0,5 – 5 g zmesi. Stacionárne fázy sú tie isté ako pri tenkovrstvovej chromatografii, majú však menší povrch a väčšiu zrnitosť, aby kládli menší odpor a urýchlili tak chromatografické delenie. V súčasnosti sa rýchlosť stĺpcovej chromatografie zvyšuje tým, že eluent prúdi cez stacionárnu fázu pod tlakom vzduchu alebo dusíku a v tomto prevedení sa delenie nazýva flash chromatografia. Eluent sa po prechode cez kolónu zberá do skúmaviek alebo malých baniek a prítomnosť čistých látok v jednotlivých frakciách sa zistí tenkovrstvovou chromatografiou. Zdokonalenie kvapalinovej chromatografie viedlo k vysokoúčinnnej kvapalinovej chromatografii – high precision liquid chromatography (HPLC).

Ako stacionárna fáza sa používajú špeciálne veľmi jemné nosiče s vysokoaktívnym povrchom umiestnené v oceľových trubiciach a kvapalina nimi preteká pod vysokým tlakom 10-50 MPa. Proces delenia je automatizovaný, prítomnosť čistých látok sa zisťuje detektorom, ktorý je na výstupe z kolóny. Detekcia sa deje najčastejšie meraním absorpcie v ultrafialovej oblasti spektra, prípadne meraním indexu lomu prechádzajúcej mobilnej fázy. Grafický záznam (chromatogram) je rovnaký ako pri plynovej chromatografii, no určenie pomeru zložiek v zmesi vzhľadom na rôznu absorpciu či refrakciu nie je jednoznačné. Rozpúšťadla používané ako eluenty pri HPLC chromatografii musia byť zvlášť čisté.



Obrázok 42 Kvapalinový chromatograf (TUPO 2014)

Kvapalinová chromatografia poskytuje omnoho širšie možnosti separácie v porovnaní s plynovou chromatografiou, pretože umožňuje deliť látky so širším rozsahom molekulových hmotností, bez derivatizácie delí mnohé zlúčeniny, ktoré pred analýzou plynovou

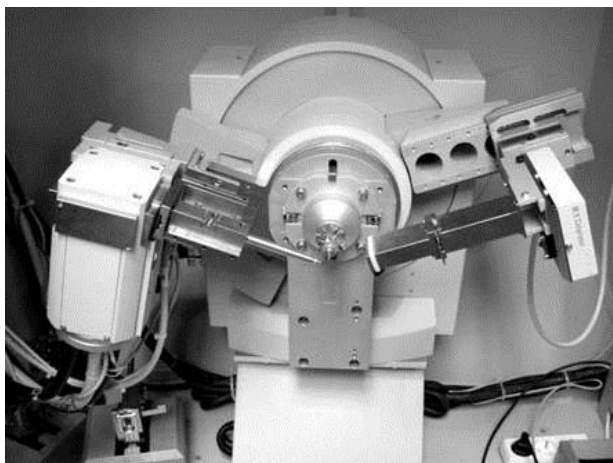
chromatografiou treba modifikovať na prchavé a termicky stabilné látky (Kačík, Geffert, Kačíková, 2007).

### 3.7.8 Röntgenová difraktografia

Difraktografia je metóda štruktúrnej analýzy materiálov založená na difrakcii (ohyb a odraz žiarenia). Výsledky sa vyhodnocujú z difraktogramov, t.j. zaregistrovaných difrakčných obrazcov vzniknutých priechodom elektrónov alebo neutrónov, resp. röntgenového žiarenia skúmaným materiálom. Moderné prístroje (obrázok 43) prevádzajú výstupy difrakčných obrazcov na záznam obdobný výstupom iných spektroskopických metód – t.j. obrazce píkov v závislosti od času, resp. uhlu orientácie povrchu vzorky voči dopadajúcemu žiareniu.

Röntgenová difraktografia je experimentálna technika využívajúca difrakciu röntgenového žiarenia. Slúži na skúmanie molekulovej resp. kryštalickej štruktúry tuhých a pastovitých látok.

Metódy röntgenovej difraktografie sú Laueova metóda, metóda rotujúceho kryštálu, Debyeova – Scherrerova metóda.



Obrázok 43 Difraktograf (www.xray.cz)

## **4 MODELOVANIE ROZVOJA VNÚTORNÉHO POŽIARU**

V posledných rokoch bolo vyvinutých viacero programových prostredí, počítačových modelov, ktoré umožňujú modelovať priebeh požiaru. Ide o veľmi progresívny prístup, ktorý má svoje uplatnenie ako pri navrhovaní požiarnej bezpečnosti stavieb, výbere vhodných materiálov a konštrukcií, návrhu účinného stabilného hasiaceho zariadenia či v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov, pri overovaní konkrétnych scenárov vzniku a rozvoja požiaru.

Táto kapitola monografie je venovaná bližšiemu priblíženiu problematiky modelovania a modelovania požiarov, ako aj jednotlivých programových prostriedkov používaných pre tento účel.

### **4.1 Modelovanie - princípy a metódy**

#### **4.1.1 Východiská popisu a výpočtov rozvoja požiaru v dynamike požiaru**

Pri popise rozvoja požiaru v dynamike požiaru sa vychádza z údajov o rýchlosti a množstve uvoľnenej energie, mechanizmov prenosu energie a parametrov prostredia.

Pre kvalitatívny a kvantitatívny popis požiarov je potrebné vychádzať z definícií základných pojmov v dynamike požiaru a z výpočtov týkajúcich sa procesu horenia príslušných materiálov, zo vzniku, rozvoja a šírenia sa požiaru a faktorov vplývajúcich na rozvoj požiaru. Pre správny výpočet (odhad) rýchlosti a množstva uvoľnenej energie je rozhodujúcou charakteristikou množstvo horľavej látky (paliva).

Pre získanie vstupných údajov môžeme využiť aj výsledky experimentálnych stanovení požiaro-technických charakteristík horľavých látok.

V prípade horľavých kvapalín a horľavých polymérnych tuhých látok ako aj niektorých výrobkov vďaka doteraz realizovaným experimentom sú k dispozícii v rôznych databázach presné údaje o uvoľnenej energii, rýchlosti odhorievania, rýchlosti vzniku a koncentrácii spalín a i. Avšak v prípade použitia takýchto údajov je potrebné v konkrétnom prípade zohľadniť dostupnosť a rýchlosť prístupu kyslíka, t. j. ventilačné podmienky. Pri počítačovom modelovaní je vhodné použitie softvérov, ktoré disponujú databázou materiálov z dôvodu výberu najvhodnejšej krivky rýchlosti uvoľňovania energie.

V prípade rozvoja požiaru sa stretávame, v závislosti od materiálových vlastností prostredia a fázy požiaru, s tromi mechanizmami (radiácia, konvekcia, kondukcia) prenosu energie. Pri

zjednodušených výpočtoch a modelovaniach sa uvažuje s homogénou prostredia a mechanizmus prenosu energie sa zanedbáva. Dôležité sú otázky vzniku energetickej rovnováhy, výpočet tepelného toku (kritický tepelný tok), teploty povrchu a teplotných profilov materiálu.

Zmeny parametrov prostredia pri rozvoji požiaru sa počítajú riešením série diferenciálnych rovníc založených na aplikácii zákonov zachovania hmotnosti a energie a fyzikálnochemickej podstaty požiaru. Týmto spôsobom sa získajú časové závislosti prenosu tepla a látky, zmien tlaku plynov, výmeny plynov cez otvory, zadymenia, zmeny teploty v priestore. Regresné rovnice sa verifikujú na experimentálnych meraniach z reálnych požiarov.

Rýchlejšie odhady je možné získať využitím tabuľkových vstupných hodnôt pri ručnom počítaní, kedy sa využijú zjednodušené rovnice na výpočet dôležitých parametrov (teplota, úbytok kyslíka, pokles vrstvy zadymenia) pre rozvíjajúci sa a plne rozvinutý požiar.

#### **4.1.2 Modely požiaru a modelovanie vnútorného požiaru**

Modelovanie požiarov možno považovať za jeden z nástrojov umožňujúcich pochopenie správania požiaru. Tento nástroj je možné využiť na overenie jednotlivých hypotéz, resp. scenárov, vzniku požiaru alebo na získanie popisu priebehu požiaru.

Modely požiaru môžeme vo všeobecnosti rozdeliť do troch veľkých skupín. Sú to empirické fyzikálne a matematické modely. Pre modelovanie vnútorných požiarov (požiarov v uzavretom priestore) sa využívajú najmä matematické a fyzikálne modely.

Empirické modely (Halada, Glasa 2013) vychádzajú zo skúseností (empírie) získanej z pozorovaní predchádzajúcich požiarov a požiarových testov, na základe ktorých dospel výskum k odvodeniu fyzikálnych korelácií a zákonitostí popisujúcich správanie požiaru za daných podmienok. Modely riešia postup požiaru v 2D súradniciach. Využívajú sa predovšetkým na modelovanie požiarov na rozľahlých plochách, ako sú lesy, lúky, pasienky. Základom je určenie rýchlosti postupu línie požiaru vzhľadom na prostredie, v ktorom sa modelovaný požiar nachádza a šíri. Dôležitý je typ paliva, meteorologické podmienky a topografia terénu (nadmorská výška, sklon svahu a podobne).

Jednou z veľmi často využívaných metód je aj metóda celulárnych automatov, pri použití ktorej je plocha rozdelená na pravidelnú štruktúru buniek (spravidla štvorce 10 x 10 metrov). Je založená na algoritme, ktorý umožňuje šírenie požiaru z horiacej bunky do susedných buniek v diskretnom čase pre daný typ paliva, meteorologické podmienky a topológiu terénu. Postup línie požiaru sa pritom počíta podľa známych fyzikálnych princípov.



Vektorová metóda využíva eliptický vlnový princíp šírenia požiaru (Huygensov princíp). Plocha, na ktorej sa modeluje požiar, je braná ako spojité prostredie. Pre vybrané body na línii požiaru sa aplikuje Rothermelov vzťah (Rothermel 1972), podľa ktorého je rýchlosť postupu požiaru definovaná na základe reakčnej intenzity (tepelnej produkcie na jednotkovú plochu). Každý bod na línii požiaru je zdrojom požiaru, ktorý sa v najbližšom okolí rozšíri na eliptickú plochu. Vychádza sa z experimentálne overenej hypotézy, že na rovinatej ploche za bezvetria sa požiar šíri v kruhovej línii a za vetra sa šíri v eliptickej línii.

Pre empirické modely je charakteristické: sú určené pre požiare na rozsiahlych plochách (desiatky hektárov); realizujú dvojrozmernú simuláciu; využívajú delenie priestoru na relatívne veľké bunky, v ktorých sa predpokladajú priemerné hodnoty parametrov; zahŕňajú veľmi obmedzený rozsah fyziky a chémie horenia a uskutočňujú rýchly výpočet (obvykle stačí sériový počítač).

Fyzikálny model je umelo vytvorený objekt, pomocou ktorého je možné objasniť nejaký fyzikálny jav alebo nový poznatok. Modely zamerané na popis priebehu požiaru sa pokúšajú reprodukovat' javy sprevádzajúce požiar v zjednodušených fyzikálnych podmienkach. Preto žiadny fyzikálny model nevystihuje všetky stránky skutočného javu a nemôže sa so skutočným javom stotožňovať. Skutočný fyzikálny jav je vždy komplexnejší a zložitejší ako jeho model. Fyzikálne modely sú tiež zvyčajne časovo i finančne náročnejšie ako matematické modely. (Kučera, Pezdová 2010)

Účelom fyzikálnych modelov (Kučera, Pezdová 2010) je napodobnenie požiaru za zjednodušených fyzikálnych podmienok. Pričom rozmery týchto modelov sú rôzne. Priebehu požiaru v reálnych podmienkach sa podobajú najviac veľkorozmerové skúšky. Avšak ich realizácia často naráža na prekážky a to ako v zmysle nákladovosti, tak aj zložitosti pri zostavovaní. Aj z tohto dôvodu sa výskum zameriava viac na skúmanie správania požiaru prostredníctvom modelov v zmenšenej fyzikálnej mierke.

Fyzikálne modelovanie neznamená jednoduché vykonanie experimentu na zmenšenom fyzikálnom modeli. Jednoduché (lineárne) zmenšenie geometrických rozmerov nie je dostatočné. V zmenšenom modeli musí byť dodržaná tiež mechanická, tepelná a chemická podobnosť s reálnym objektom. Zákonitosti potrebné pre zachovanie tejto podobnosti môžu byť odvodené z dimenzionálnej analýzy alebo zo základných rovníc popisujúcich fyzikálno-chemické javy.

Najznámejšie a najrozšírenejšie fyzikálne zákonitosti zmien mierky pri požiaroch sú známe pod názvom Froudovo modelovanie, ktoré je použiteľné najmä pre prúdenie pri požiaroch. Froudovo číslo  $F_r$  je dané vzťahom [70]

$$F_r = \frac{v^2}{l \cdot g} \quad [70]$$

kde  $v$  je charakteristická rýchlosť ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $l$  je fyzikálny rozmer (dĺžka) (m),  $g$  je gravitačné zrýchlenie ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Froudovo modelovanie podmienok pri požiaroch vychádza z dodržania pomeru oblúkovitých a zotrvačných síl. De Ris (1973) teoreticky odvodil dimenzionálnou analýzou väzbu medzi charakteristickou rýchlosťou ( $v$ ) a tepelným tokom požiaru ( $\dot{Q}$ ), kedy  $v \sim \dot{Q}^{1/5}$ . Empiricky toto následne potvrdil McCaffrey (1979). Za týchto predpokladov Froudovo číslo zodpovedá [71]

$$F_r \approx \frac{\dot{Q}^{2/5}}{D} \quad [71]$$

kde  $\dot{Q}$  je tepelný tok požiaru ( $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $D$  je mierka fyzikálneho modelu.

Froudovo modelovanie je možné úspešne použiť na štúdium vzostupných prúdov nad požiarom, podstropného prúdenia a výšky plameňa.

Nakoľko zmena mierky sa u rizikových javov sprevádzajúcich požiar prejavuje rozdielne, nie je vo všeobecnosti možné študovať komplexnú požiaru situáciu v malej mierke. Prakticky je nemožné modelovať naraz v rovnakej mierke zmenšenie radiácie a vzostupné prúdenie.

Z tohto dôvodu nie je možné Froudovo modelovania jednoducho aplikovať na požiarne problémy, v ktorých hrá významnú úlohu radiácia. Fyzikálne modelovanie sa používa prakticky pri všetkých štandardných požiarových testoch. Adekvátnosť fyzikálnych modelov pritom môže byť variabilná. V súčasnosti sa pri vývoji moderných požiarových testov už uplatňuje trend explicitne popísať ich adekvátnosť ako fyzikálnych modelov reálneho priebehu požiaru a reakcie na požiar.

Matematické modely sa zakladajú na numerickom riešení diferenciálnych rovníc riešených pre reálne hodnoty alebo pre diskretizované časové alebo priestorové veličiny.

Matematické modely sa využívajú na modelovanie požiarov v 3D priestoroch menšieho rozsahu. Ich rozvoj bol podmienený formulovaním fyzikálnych a chemických procesov počas požiarov. Tieto modely sú založené na zákonoch zachovania hmotnosti, hybnosti, energie a

zložky (stavová rovnica), modeloch spaľovania paliva a tepelného žiarenia. Pomerne presne sa tak dajú určiť javy prebiehajúce v ľubovoľnom bode 3D priestoru, pričom jednotlivé body sa vzájomne ovplyvňujú.

Matematické modely možno vo všeobecnosti rozdeliť na deterministické modely, pri ktorých je priebeh požiaru určený fyzikálnymi a chemickými dejmi a pravdepodobnostné modely, pri ktorých je rozvoj požiaru popísaný celým súborom náhodných udalostí alebo javov.

Deterministické matematické modely sa ďalej delia na zónové modely, modely typu pole a simulačné modely.

Zónové modely začali vznikať v 70. rokoch. Vzhľadom na malé výpočtové kapacity vtedajších počítačov sa spravidla simuloval požiar v jednej miestnosti.

Zónové modely sa vo všeobecnosti delia na jednozónové a dvojzónové.

Dvojzónový model spočíva v rozdelení miestnosti na dva homogénne kontrolné objemy, pričom pri jednozónovom modeli sa uvažuje s jedným homogénnym priestorom. Horný, horúci kontrolný objem v dvojzónovom modeli je vyplnený produktmi horenia, kužeľom požiaru a teplým vzduchom v hornej vrstve miestnosti. Dolný, studený kontrolný objem je tvorený zariadením miestnosti a chladnejším vzduchom v dolnej časti miestnosti, prípadne prisávaným vzduchom. V zónových modeloch sa neuvažuje prúdenie vo vnútri kontrolného objemu. Vo výpočtoch v pozadí sa riešia diferenciálne rovnice zachovania hmotnosti a energie, Bernoulliho rovnica riešiaci výmenu plynov s okolitým prostredím a rovnica prenosu tepla.

Zónové modely sú značne zjednodušené, zanedbávajú tepelnú kapacitu predmetov v miestnosti, trenie tekutín, dobu potrebnú k prenosu splodín požiaru k stropu miestnosti a podobne.

Medzi systémy, ktoré sú založené na aplikácii zónových modelov patria ARGOS (Deijbjerg et al. 2003), CFAST (Peacock, Reneke, Forney 2017), BRANZFIRE (Wade 2004).

Modely typu pole (field models) sú v praxi často označované aj ako CFD (Computational Fluid Dynamics) modely. Metóda spočíva vo vytvorení trojrozmernej výpočtovej siete, pričom vlastnosti v rámci jednej bunky sú konštantné.

CFD modely šírenia požiaru sú založené na dynamike plynov a na skúsenostiach získaných z používania CFD počítačových programov vychádzajúc zo zákonov zachovania hmotnosti, hybnosti a energie. Základom výpočtu sú parciálne diferenciálne rovnice, Navier-Stokesove rovnice obsahujúce druhé derivácie podľa priestoru a prvé derivácie podľa času. Tieto rovnice riešia prúdenie tekutín, dynamiku plynov indukovaných teplom uvoľňovaným z požiaru,

pričom uvažujú trecie vnútorné sily. CFD modely spravidla obsahujú čiastkové modely, ktoré riešia procesy súvisiace s požiarom, ako sú spaľovanie, prenos tepla, turbulencia plynov a podobne. Niektoré z CFD modelov sú založené na RANS (Reynoldsaveraged Navier–Stokes) rovniciach, ktoré predstavujú časovo aproximované pohybové rovnice pre prúdenie tekutín, pôvodne navrhnuté na popis turbulentného prúdenia.

Tvar rovníc v CFD modeloch je upravený oproti pôvodným rovniciam, ktoré popisujú aj javy nevyskytujúce sa počas požiaru (Rehm, Baum 1978).

Opísané modely správania požiaru sú implementované v programových systémoch, pričom niektoré z nich sa bližšie špecializujú na konkrétny typ požiaru (napríklad empirické modely sú určené predovšetkým na simuláciu požiarov v prírodnom prostredí), iné sú univerzálnejšie.

Medzi najčastejšie používané CFD systémy, založených na aplikácii modelov typu pole, ktoré je možné nasadiť v prípade modelovania správania vnútorných požiarov, t.j. požiarov v uzavretom priestore, patria systémy ako Fire Dynamic Simulator – FDS (McGrattan et al. 2013a) a jeho grafické rozhranie PyroSim a SMARTFIRE (Taylor et al. 1996).

V nasledujúcej kapitole sú uvedené základné charakteristiky vybraných systémov založených na zónových modeloch i modeloch typu pole (CFD systémy).

## **4.2 Programové prostredia na báze zónových modelov a CFD systémov vhodné pre modelovanie vnútorných požiarov**

V tejto podkapitole sú bližšie popísané charakteristiky jednotlivých zónových modelov požiaru používaných pre modelovanie šírenia požiaru a dymu v uzavretom priestore. Podrobnejšie je popísaný najmä systém FDS, ktorý bol v monografii aplikovaný ako základné prostredie pre modelovanie vybraných scenárov požiaru v jednopodlažnej obytnej stavbe.

### **4.2.1 ARGOS**

Program ARGOS je založený na aplikácii zónového modelu. Slúži na výpočet a vyhodnotenie požiarneho rizika s predpoveďou šírenia splodín horenia, vývoja teploty pri požiaru, prestupu tepla atď. Požiar dokáže modelovať súčasne v rozsahu niekoľkých miestností.

ARGOS umožňuje zdokumentovanie analýzy rizík, on-line predstavenie výsledkov simulácie, obsahuje systém na výpočet doby reakcie sprinkleru a zahŕňa aj čas príchodu hasičov. V archíve ARGOS si užívateľ môže vybrať jeden z rôznych typov požiaru (požiar pevných látok, požiar

kvapalín, požiar fľaše s kvapalinou, tlenie predmetov). Okrem toho umožňuje užívateľovi nastaviť vlastné vstupné údaje požiaru (Bernatík 2006).

ARGOS vytvára výstupné informácie (texty, tabuľky a grafy), aj preto si nevyžaduje následné spracovanie výsledkov v inom programe.

ARGOS využívajú najmä výskumníci, poisťovne, zisťovatelia príčin vzniku požiarov a priemyselné spoločnosti z hľadiska prevencie závažných priemyselných havárií.

Pre školy a iné inštitúcie podobného druhu poskytuje dánska organizácia program zdarma. Inak je možné získať bezplatne len 30 dennú verziu a to na stránkach [www.argos.dk](http://www.argos.dk).

#### **4.2.2 CFAST**

CFAST reprezentuje konsolidovaný model, ktorý umožňuje modelovanie šírenia požiaru a dymu v celom prostredí (vo všetkých miestnostiach) konkrétnej stavby (Peacock, Reneke, Forney 2017).

Bol vyvinutý v divízii výskumu požiarov Národného úradu pre normalizáciu a technológie (NIST). Dostupný je ako voľne šíriteľný program.

Ide o dvojzónový požiarový model, ktorý predpovedá tepelné prostredie spôsobené požiarom v rámci členitej stavby (umožňuje modelovať požiar až v 30 miestnostiach súčasne). Každá subštruktúra tejto stavby je rozdelená na hornú a dolnú vrstvu plynu (zóna vo význame zóny požiarneho modelu označuje vrstvy, ktoré sú modelované). Pri požiaroch sa zvyčajne šíria produkty horenia prostredníctvom vzostupného prúdu spalín z dolnej vrstvy do hornej vrstvy. Teplota v každej vrstve je rovnaká a jej vývoj v čase je opísaný súborom diferenciálnych rovníc odvodených zo základného zákona zachovania hmoty a energie. Šírenie dymu a tepla zo zóny do zóny je dané empirickými koreláciami. Pretože rovnice používané na výpočet šírenia požiaru a dymu sú relatívne výpočtovo nenáročné, simulácie v CFAST pri práci s bežným osobným počítačom zvyčajne trvajú len niekoľko desiatok sekúnd.

Pre zobrazenie výsledkov modelovania, podobne ako FDS, aj CFAST využíva program Smokeview. Tento využíva na zobrazenie farebných trojrozmerných animácií výsledkov simulácie špecifického požiaru z CFAST.

### **4.2.3 BRANZFIRE**

BRANZFIRE je komerčný program vyvíjaný spoločnosťou BRANZ z Nového Zélandu.

Ide o počítačový zónový model, ktorý umožňuje modelovať šírenie a počítať vybrané parametre požiaru a dymu súčasne až v 12 miestnostiach. Zahŕňa model šírenia plameňa a rozvoja požiaru plne aplikovateľný pre modelovanie požiaru v uzavretom priestore. Je určený najmä na modelovanie rohových požiarov v zmysle ISO 9705, t.j. rohový test. Model šírenia plameňa a rozvoja požiaru je založený na aplikácii matematických vzťahom odvodených Quintierom.

Vstupnými údajmi do modelovania sú údaje získané z kónického kalorimetra. Model umožňuje vypočítať teploty plynov v jednotlivých vrstvách, výšku neutrálnej roviny, tlak a rýchlosť prúdenia vzduchu, teplotu povrchu, obsah a koncentráciu splodín horenia v jednotlivých miestnostiach posudzovanej stavby (Wade 2004).

V súčasnosti spoločnosť BRANZ postupne nahrádza tento program novovyvíjaným programom B-RISK, ktorý je kombináciou deterministického/pravdepodobnostného modelu požiaru, ktorý umožňuje šírenie požiaru a dymu simulovať vo vnútri uzavretých priestorov a v simuláciách pre opakované iterácie toho istého scenára využíva pravdepodobnostnú simulačnú metódu Monte Carlo.

### **4.2.4 Fire Dynamic Simulator**

Systém Fire Dynamics Simulator – FDS (McGrattan et al. 2013a, 2013b) je voľne šíriteľný programový systém na počítačovú simuláciu požiaru, v ktorom je implementovaný CFD model požiaru, schopný využívať výpočtovú kapacitu súčasných počítačov. Bol vytvorený v NIST (Národný úrad pre normalizáciu a technológie, USA) v spolupráci s VTT (Technical Research Centre of Finland, Fínsko) a testovaný mnohými svetovými univerzitami, laboratóriami a vedeckovýskumnými strediskami.

FDS sa používa na riešenie problémov požiarneho inžinierstva a súčasne je nástrojom na štúdium dynamiky požiaru a horenia.

Pre uľahčenie práce je možné využívať grafické používateľské rozhrania ako sú PyroSim alebo BlenderFDS.

PyroSim vyvinula americká spoločnosť Thunderhead Engineering (USA) v r. 2008. K základným funkciám GPR PyroSim patrí interaktívne vytváranie komplexnej geometrie priestoru, v ktorom sa modeluje požiar (vytváranie modelov stavieb pomocou pôdorysov,

vytváranie opakujúcich sa objektov, zakrivených stien a iných komplexných prvkov stavieb, ako napríklad schodisko a pod.), importovanie existujúcich vstupných FDS súborov a v určitej obmedzenej miere i modelov vytvorených v softvérovej aplikácii AutoCAD (Computer Aided Design vyvinutý pre 2D a 3D dizajn). Súčasná verzia GPR PyroSim integruje okrem editora geometrie pre FDS aj samotný systém FDS a vizualizačný program Smokeview, ktorý je súčasťou FDS. (Valášek 2012)

FDS je vo všeobecnosti komplexný programový systém, ktorý simuluje prúdenie plynov indukovaných požiarom, šírenie tepla vyžarovaním, horenie, odhad koncentrácie látok uvoľnených počas požiaru.

Môže simulovať požiare v rôznych objektoch, napríklad v budovách, garážach, tuneloch, technických zariadeniach (napr. v autách).

Na riešenie dynamiky plynov nepotrebuje modelovať požiar, preto môže riešiť napríklad aj pohyb toxických plynov v priestoroch bez požiaru. Všetky vstupné údaje sa zadávajú pomocou jedného textového vstupného súboru, pričom najzložitejšie často býva definovanie geometrie modelovaného priestoru.

Aby bola simulácia požiaru čo najpresnejšia, je potrebné zadefinovať geometriu a vlastnosti všetkých, pre požiar a jeho šírenie nevyhnutných, telies a otvorov v danom priestore. Tie sa potom podľa svojich chemických a fyzikálnych vlastností môžu správať ako prekážka šírenia požiaru a prúdenia plynov, viesť alebo vyžarovať teplo, alebo horieť. Taktiež môžu tlmiť intenzitu požiaru alebo byť voči nemu inertné (nie sú ním ovplyvňované a nemajú na požiar žiaden vplyv).

Samotné prostredie FDS obsahuje niekoľko modelov (Štecková 2014).

Hydrodynamický model numericky rieši formu Navier-Stokesových rovníc upravených pre nízkorýchlostný, tepelne riadený tok s dôrazom na dym a prenos tepla z požiaru. Jadro algoritmu je schéma typu prediktor-korektor, ktorá má druhý rád presnosti v priestore a čase. Prúdenie plynov počas požiaru pri nízkych rýchlostiach ostáva laminárne a prekážku len obteká. Od určitej rýchlosti vznikajú víry, tzv. turbulentné prúdenia.

Radiačný prenos tepla je zahrnutý v modeli cez riešenie rovníc prenosu tepla radiáciou (RTE – Radiation Transport Equation) pre šedý plyn (McGrattan et al. 2013b). V niektorých prípadoch sa používa širokopásmový model na získanie lepšej spektrálnej presnosti. Rovnica radiácie je riešená použitím metódy konečných objemov pre konvektívne šírenie tepla, pričom vyžaduje

približne 20 % z celého výpočtového času. Absorpčné koeficienty plynných sadzí sú počítané použitím RadCal narrow-band modelu (Grosshandler 1993).

Efektivita výpočtu simulácie pomocou systému FDS je spôsobená použitím jednoduchej ortogonálnej numerickej mriežky, ktorej musí zodpovedať reprezentácia priestoru, v ktorom prebieha modelovaný požiar a telies, ktoré sa v ňom nachádzajú. To môže predstavovať určité obmedzenie v situáciách, kedy geometria telies nezodpovedá výpočtovej mriežke. Systém automaticky upraví rozmery telies tak, aby súhlasili s výpočtovou mriežkou.

FDS nie je systém na báze CAD (Computer Aided Design), schopný zobrazovať najmenšie detaily geometrie, ale je to predovšetkým CFD model, ktorého úlohou je numericky riešiť parciálne diferenciálne rovnice. Pri vytváraní geometrie je preto potrebné reprezentovať telesá, ktoré ovplyvňujú šírenie požiaru, pôsobia ako prekážka jeho šírenia, alebo prispievajú k intenzite požiaru, horia, zohrievajú sa, alebo vedú teplo. Pritom nemusia byť reprezentované všetky geometrické detaily; maximálne rozlíšenie predstavuje veľkosť bunky výpočtovej mriežky.

Súčasne je pre model horenia (požiaru) potrebné zadať skutočné množstvo materiálu a to určením hrúbky materiálu. Na reprezentáciu šikmých povrchov telies v pravouhlej mriežke existuje technika „vyhladenia“ povrchu, pri ktorej systém uskutočňuje výpočty ako s nevyhladeným povrchom, ale programátorsky je ošetrované odstránenie turbulencií, ktoré vznikajú v blízkosti šikmých povrchov reprezentovaných v pravouhlej mriežke. Šikmý povrch sa v tomto prípade vizualizuje ako hladký povrch.

Medzi nevyhnuté vstupné parametre pre povrchy telies, ktoré je potrebné určiť, patria vlastnosti materiálu. V FDS je možné do simulácie zahrnúť aj zariadenia na meranie parametrov požiaru, ako je napríklad uvoľnené teplo, teplota stien, telies alebo plynov v bodoch priestoru alebo v rezoch, koncentrácia plynov (napr. CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), viditeľnosť a pod.

Systém FDS dokáže modelovať požiar dvoma spôsobmi. Pri prvom spôsobe sa v simulovanom priestore najskôr určí množstvo horľavých materiálov, ktoré sa líšia svojimi tepelno-fyzikálnymi vlastnosťami, chemickým zložením a priestorovým uložením. Následne FDS dokáže vypočítať rýchlosť horenia a odhorievania, pričom berie do úvahy aj fakt, že počas pyrolýzy vznikajú uhlíkové zvyšky a ďalšie produkty horenia ako napr. vodná para, plynné palivo, ktoré môžu ovplyvniť dynamiku požiaru. Druhý spôsob je založený na zadaní množstva tepla uvoľneného z jednotkovej plochy za jednotku času (Heat Release Rate Per Unit Area – HRRPUA).



Za jeden z najdôležitejších vstupných parametrov do modelovania sa považuje najmä maximálna rýchlosť uvoľňovania tepla produkovaného z 1 m<sup>2</sup> pri požiaroch riadených palivom. (Kučera, Pezdová 2010)

Aktivácia hasiacich rozprašovacích systémov a tepelných alebo dymových detektorov je v FDS modelovaná pomocou jednoduchých vzťahov pre tepelnú zotrvačnosť rozprašovačov a tepelných detektorov a oneskorenia prenosu dymových detektorov.

Sprinklery (stabilné hasiace zariadenia založené na báze rozprašovania hasiaceho média) sú modelované pomocou Lagrangeových častíc, ktoré predstavujú reprezentáciu vodných kvapiek emitovaných z rozprašovačov.

Vo vstupnom súbore je potrebné určiť tiež výstupné parametre, pretože po dokončení výpočtu a simulácie požiaru nie je možné spätne získať informácie, ak neboli na začiatku špecifikované.

System FDS teda ukladá len informácie o užívateľom definovaných parametroch požiaru. Medzi výstupné parametre plynnej fázy patria: teplota, rýchlosť toku, koncentrácia plynov (CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, vodná para), hustota dymu, viditeľnosť, tlak, index uvoľneného tepla na jednotku objemu, hmotnostné zlomky, hmotnosť vodných kvapiek na jednotku objemu.

Vplyv požiaru na konštrukcie stavieb určujú výstupné parametre, ako sú teplota plôch a telies, tepelný tok (celkový, radiačný a konvektívny) a rýchlosť horenia. Tiež sa dá sledovať celkové uvoľnené teplo, časová aktivácia sprinklerov a detektorov či šírenie požiaru z reprezentovanej oblasti cez otvory, von z uzavretého priestoru.

Väčšina výstupných parametrov je zobrazovaná vizualizačným programom Smokeview (Forney 2013), ktorý reprezentuje animáciu prúdenia dymu, animáciu rezov výstupných plyných parametrov a animované plošné a priestorové dáta. Tiež zobrazuje kontúry a vektory štatistických dát kdekoľvek v hraniciach výpočtovej oblasti v danom čase a umožňuje spriehľadniť niektoré steny, aby bolo možné sledovať fyzikálne javy a priebeh požiaru.

FDS a Smokeview sú používané spoločne na modelovanie a vizualizáciu požiaru.

Grafickým rozhraním FDS je PyroSim. Rozhranie PyroSim poskytuje okamžitú spätnú väzbu vo vzťahu k zadávaniu vstupných údajov do FDS, pričom zabezpečuje tvorbu správneho formátu vstupného súboru FDS. Okrem toho umožňuje import CAD súborov pre vytváranie a správu komplexných modelov požiaru, poskytuje rozvinuté nástroje na kreslenie 2D a 3D geometrie, integrované paralelné spracovanie údajov, flexibilný systém jednotiek (podporujúci prácu v metrických alebo anglických jednotkách), nástroje na správu viacerých sietí, systémy

HVAC (vykurovanie, ventilácia a klimatizácia) integrované do CFD simulácie, import existujúcich FDS modelov, integrovaný post-processing.

Evakuáciu osôb počas požiaru a pôsobenie požiaru na priebeh evakuácie je možné v FDS modelovať pomocou modulu Evac (Korhonen, Hostikka 2009), ktorý je schopný simulovať účinok požiaru na správanie evakuovaných ľudí, na ich pohyb a rozhodovanie počas evakuácie (Purser 2002).

Pri aplikácii systému FDS na simuláciu určitého typu požiaru je treba pri návrhu vstupných parametrov, realizácii výpočtu a interpretácií výsledkov simulácie brať do úvahy niektoré špecifiká a ohraničenia systému.

Keďže model bol pôvodne navrhnutý na analýzu požiarov vznikajúcich najčastejšie v priemyselnej výrobe, môže byť spoľahlivo použitý pre modelovanie parametrov požiarov so známym tepelným výkonom, pričom hlavným zámerom simulácie je pozorovanie šírenia tepla a produktov spaľovania.

V týchto prípadoch, presnosť výsledkov modelovania rýchlostných a teplotných tokov závisí od hustoty výpočtovej mriežky.

Systém FDS nevnáša do výpočtu rýchlosti a teploty väčšiu chybu, než je chyba meraní počas experimentálnych testov (McGrattan et al. 2013b). V požiarových scenároch, v ktorých intenzita požiaru nie je známa, je možné predpokladať väčšiu nepresnosť výpočtov, nakoľko vlastnosti materiálov a paliva sú často neznáme a je ťažké ich získať, fyzikálne a chemické procesy počas požiaru sú komplikovanejšie ako matematické modely implementované v FDS a výsledok výpočtov je citlivý na numerické aj fyzikálne parametre.

Napriek vývoju FDS, ktorý sa snaží o zmenšenie nepresnosti výpočtu, používanie tohto softvéru vyžaduje rozsiahle odborné znalosti používateľa.

V minulosti bol systém FDS aplikovaný na výskum a simuláciu rôznych typov požiarov v rôznych typoch objektoch ako autá (Weisenpacher, Glasa, Halada 2012), tunely (McGrattan, Hamins 2006, Hu, Fong 2007), uzavreté miestnosti (Hwang et al. 2010), domy a viacpodlažné domy (Kucharčíková 2006; Mózerová 2009; Zhang et al. 2010; Kučera, Pezdová 2010; Štofíra 2013), jadrové elektrárne (Hill et al. 2010), haly s vyššou koncentráciou návštevníkov, ako sú kiná (Glasa et al. 2012), divadlá (Wu et al. 2008), supermarkety (Ling, Kan 2011), letiskové haly (Hu et al. 2005) a pod.

Doterajšie simulácie potvrdili, že FDS je užitočný nástroj pre simuláciu požiaru a šírenia dymu a pre riešenie rôznych problémov v oblasti zlepšovania požiarnej bezpečnosti objektov.

#### **4.2.5 SMARTFIRE**

SmartFire je skupinou požiarneho inžinierstva (Fire Safety Engineering Group – FSEG) vyvíjaný už niekoľko rokov a vychádza najmä zo skúseností odborníkov na oblasť požiarnej bezpečnosti z Greenwichskej univerzity v Londýne. Prvá verzia programu vznikla už v roku 1996 pod názvom SmartFire V1.0 ALPHA a slúžila na univerzite výhradne len pre účely inštitucionálneho výskumu. V súčasnosti systém (posledná verzia SMARTFIRE ver. 4.3) obsahuje celkovo 5 základných modulov:

- Návrhár scenárov (Scenario Designer), ktorý slúži na importovanie 2D CAD geometrie do prostredia SMARTFIRE;
- Špecifikácia prostredia (Case Specification Environment), t.j. užívateľské rozhranie, ktoré užívateľovi umožňuje užívateľovi rýchlo vytvárať a konfigurovať zložité scenáre modelovania pomocou 3D objektovo orientovaného prostredia;
- Automatický systém nastavenia parametrov siete (Automated Meshing System), t.j. expertný automatizovaný generátor pre nastavenie parametrov siete, tak aby spĺňala požiadavky konkrétnej analýzy požiaru. Okrem toho umožňuje skúseným užívateľom nastaviť parametre siete aj manuálne;
- Interaktívny CFD výpočtový nástroj (Interactive CFD Engine), ktorý poskytuje plne interaktívnu kontrolu a monitorovanie procesu jednotlivých výpočtov na pozadí programu;
- Prehliadač údajov (Data Viewer), ktorý umožňuje jednoduchú tvorbu grafiky a animácií v štýle virtuálnej reality.

Výhodou programu SMARTFIRE je, že dokáže simulovať horúce, turbulentné a stúpajúce toky plynov v ľubovoľne veľkom a členitom objekte, dokáže pracovať i s nepravidelnou sieťou kontrolných objemov, horenie umožňuje definovať objemovým zdrojom tepla alebo množstvom plynného paliva. Okrem toho obsahuje aj preddefinovanú knižnicu materiálov, ktorú je možné dopĺňať.

SmartFire je tiež jeden z mála modelov, ktoré dokážu spolupracovať s evakuačným modelom – EXODUS. Výsledky tohoto modelu sa približujú realite. Tým vlastne vznikne prepojenie medzi modelom simulujúcim scenár požiaru so všetkými prejavmi požiaru a modelom zameraným na zistenie doby a priebehu evakuácie.

## 5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Výsledky testovania požiaro-technických parametrov vybraných druhov materiálov, ktoré bolo realizované v rámci riešenia projektu APVV-0057-12 „Progresívne metódy zisťovania požiarotechnických charakteristík materiálov v požiarom inžinierstve“ v predchádzajúcom období, boli implementované do modelovania scenárov rozvoja požiaru v jednopodlažnej nadzemnej stavbe typu bungalow slúžiacej na bývanie. V modelovaní sa uvažovalo so zmenou parametrov odvetrania miestností, zmenou iniciačného zdroja požiaru, resp. aj príčiny a miesta vzniku požiaru. V jednotlivých požiarnych scenároch bolo uvažované s tým, že požiar vznikne v kuchyni alebo v spálni. Modelované boli celkovo 4 požiarne scenáre.

Na tomto mieste je potrebné pozoriť, že predmetom skúmania nebolo šírenie požiaru v priestore celej stavby či prechod z vnútorného požiaru na vonkajší požiar, ku ktorému môže dôjsť v dôsledku rozbitia sklenenej výplne okien pri dosiahnutí potrebnej teploty produkovanej samotným požiarom.

Cieľom samotného experimentu bolo poukázať nielen na možnosti počítačového matematického modelovania vnútorných požiarov a aplikácie výsledkov tohto modelovania v bezpečnostnej praxi, ale tiež na potrebu testovania požiarotechnických vlastností materiálov a konštrukcií za účelom budovania databázy údajov potrebných pre modelovanie požiarnych scenárov založených na horení stavebných konštrukcií a vnútorného vybavenia budov, vrátane nábytku, podlahových krytín, a pre samotnú verifikáciu a následnú kalibráciu požiarnych modelov.

V tejto kapitole monografie je uvedená základná charakteristika použitých programových prostredí, predstavené sú použité modely stavby a jednotlivé požiarne scenáre. Ďalej je tu uvedený postup tvorby vstupných parametrov do modelovania v programe PyroSim a spustenie simulácie a vizualizácie výsledkov v prostredí SmokeView.

### 5.1. Použité programové prostredia

Pre modelovanie jednotlivých riešených požiarnych scenárov sa využilo prostredie FDS, konkrétne jeho grafické rozhranie PyroSim 2016. Vizualizácia výsledkov modelovania prebiehala v programe SmokeView ver. 5. Základné spracovanie výsledkov modelovania bolo vykonané v prostredí MS Excel 2013.

Nakoľko prostredie FDS už bolo bližšie popísané v kapitole 4.2.4 tejto monografie, jeho popis v tejto časti monografie už neuvádzame. Viac sa zameriavame na popis programových prostredí PyroSim a SmokeView.

Program PyroSim sa využíva ako forma grafického rozhrania programu (modelu) FDS. To znamená, že tvorba textových súborov so zdrojovými kódmi pre modelovanie daného požiarneho scenáru, známa z prostredia FDS, je nahradená užívateľsky prijateľnejšou variantou, ako je zadávanie vstupných parametrov do konkrétnych dialógových okien jednotlivých modulov. Zadávané parametre, resp. objekty sú automaticky znázornené v 2D alebo 3D grafickom prostredí tohto programu. Samotné modelovanie prebieha na vytvorenom FDS súbore, ktorý je vytváraný v pozadí prostredia PyroSim. Tento súbor je možné kedykoľvek z prostredia PyroSim exportovať alebo importovať existujúci FDS súbor za účelom jeho grafickej vizualizácie, prípadnej úpravy a spusteníu procesu modelovania a neskoršej vizualizácie výsledkov modelovania v programe SmokeView. Ako bolo spomenuté pre účely modelovania nami navrhnutých požiarnych scenárov bolá použitá verzia PyroSim 2016, ktorá podporuje prácu s FDS verzie 6.4.0.

SmokeView ver. 5 je softvérový nástroj určený na vizualizáciu numerických výpočtov generovaných modelom Fire Dynamics Simulator (FDS). Umožňuje simulovať a vizualizovať tok dymu (spodín horenia) vznikajúceho pri požiari. Smokeview zobrazuje dym prostredníctvom aplikácie klasických vedeckých metód, t. j. vo forme zobrazenia indikátorov toku častíc, 2D alebo 3D tieňovaných obrysov údajov o prietoku plynu, akými sú napríklad teplotné a prietokové vektory indikujúce smer a rozsah (veľkosť) tohto toku. SmokeView ponúka realistickú vizualizáciu dymu, umožňujúcu užívateľovi výsledkov nadobudnúť realistickú predstavu o priebehu požiaru. To je možné prostredníctvom zobrazenia série čiastočne priehľadných rovin, kde je stupeň priehľadnosti v každej rovine (na každom uzle siete) stanovený na základe údajov o hustote sadzí, vypočítaných v modeli FDS. Program Smokeview umožňuje tiež zobrazovať statické údaje v určitých časových intervaloch, pričom na to využíva už spomínané 2D alebo 3D obrysy údajov, ako aj už spomínané teplotné a prietokové vektory zobrazujúce smer a veľkosť toku.

## **5.2. Parametre vstupujúce do modelovania a spôsob ich získania**

Zadávanie vstupných parametrov do modelovania, t. j. aj samotná tvorba modelu stavby použitej pre tvorbu a analýzu jednotlivých požiarnych scenárov, prebiehala v prostredí PyroSim 2016.

Ako prvé boli v modeli vytvorené obvodové steny a priečky, ktoré boli ďalej doplnené o obklady a interiérové vybavenie (nábytok). Následne boli všetkým týmto objektom priradené údaje o skladbe materiálu a špecifikované hodnoty ich požiarotechnických a termofyzikálnych vlastností potrebných pre modelovanie. Do jednotlivých miestností, na povrch stien vybraných miestností, boli potom umiestnené detektory (snímače) pre zaznamenanie vybraných parametrov požiaru. Umiestnený a špecifikovaný bol iniciačný zdroj v zmysle konkrétneho riešeného požiarneho scenára a následne bola spustená simulácia a vizualizácia výsledkov v programe SmokeView.

V nasledujúcich podkapitolách sú bližšie popísané prístupy k získavaniu a tvorbe vstupných parametrov do modelovania a predstavené riešené požiarne scenáre.

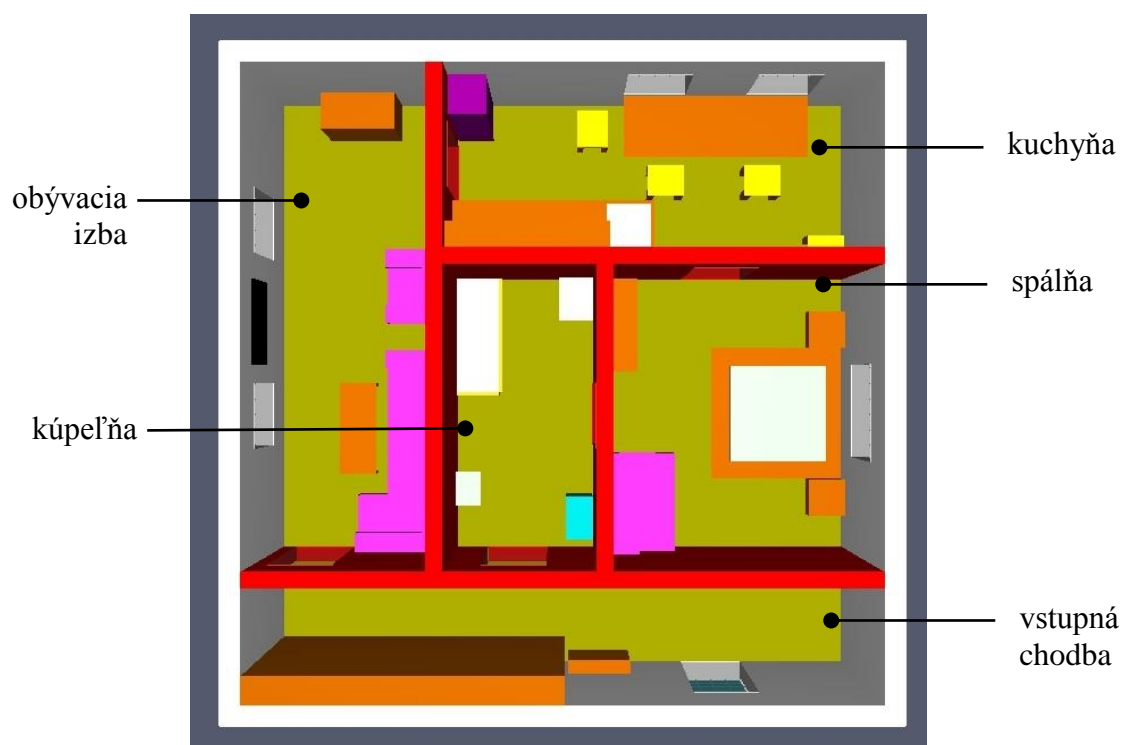
### **5.1.1 Model stavby**

Modelovanie vnútorného požiaru prebiehalo na modeli jednopodlažnej nadzemnej stavby. Tu je potrebné uviesť, že ide len o modelovú stavbu, nie o konkrétny, reálne existujúci objekt.

Jednopodlažnú nadzemnú (obytnú) stavbu, ktorá bola použitá v modelovaní reprezentoval rodinný dom typu bungalow s podlahovou plochou 100 m<sup>2</sup> (pri rozmeroch domu 10 m x 10 m x 3 m). Tento pozostával celkovo 5 miestností (vstupná chodba, obývacia izba, kuchyňa, spálňa a kúpeľňa). Vo vstupnej chodbe bol situovaný drevený botník a drevená šatníková skriňa. Zo vstupnej chodby bolo možné vojsť priamo do obývacej izby alebo do kúpeľne. Zariadenie obývacej izby tvorila čalúnená sedačka, čalúnené kreslo, drevený konferenčný stolík, drevená komoda a na stene zavesený TV prijímač. Z obývacej izby bol ďalej možný prechod do kuchyne, ktorej vybavenie tvorila drevená kuchynská linka s drezom, jedálenský stôl so štyrmi stoličkami a chladnička. Kuchyňa bola prepojená so spálňou. V spálni bola situovaná drevená manželská posteľ s matracom, 2 drevené nočné stolíky nachádzajúce sa po stranách manželskej postele, komoda, malý TV prijímač zavesený na stene a malá čalúnená sedačka. Spálňa bola ďalej spojená s kúpeľňou. Vchod do kúpeľne bol teda možný ako z chodby, tak i zo samotnej spálne. Vybavenie kúpeľne tvorila keramická vaňa, umývadlo, toaleta a automatická práčka.

Ako podlahová krytina bolo v celom dome použité homogénne PVC. Obvodové steny budovy (hrúbka 30 cm) i vnútorné priečky (hrúbka 25 cm) boli z betónu, omietnuté. V kúpeľni bol použitý keramický obklad stien. Vo výpočtoch boli uvažované dvere z dreva a sklenené výplne okien.

Detailný pohľad na situáciu jednopodlažného rodinného domu typu bungalow je uvedený na obrázku 44.



Obrázok 44 Situácia miestností a vybavenia interiéru modelovej stavby

### 5.1.2 Modelové požiarne scenáre

Celkovo boli testované 4 požiarne scenáre.

Jedným z požiarnych scenárov bol požiar, ktorého príčinou bol vriaci olej na panvici stojacej na varnej doske situovanej na vrchu dolnej časti kuchynskej linky, ktorá spôsobila požiar samotnej kuchynskej linky.

Druhým z modelovaných požiarnych scenárov bol požiar, ktorý vznikol v spálni. Jeho príčinou bol pokazený ohrievač, ktorý bol používaný na dodatočný ohrev vzduchu v miestnosti. Ten dosahoval v čase vzniku požiaru teplotu 600 °C. Nakoľko sa nachádzal v blízkosti manželskej postele, spôsobil vznietenie (retardérom horenia nechráneného) matraca postele. Meneným faktorom v jednotlivých požiarnych scenároch bolo odvetranie.

Z hľadiska odvetrania priestoru sa v prípade požiarnych scenárov uvažovalo s požiarom bez odvetrania (scenár odvetrania 1) a s odvetraním (scenár odvetrania 2).

Odvetranie prostredníctvom okien bolo nastavené pri požiaroch v kuchyni na rozbitie sklenej výplne okna pri dosiahnutí 300 °C na termočlánku umiestnenom na oknách v kuchyni.

Pri požiaroch v spálni sa uvažovalo odvetraním miestnosti prostredníctvom rozbitia sklenej výplne pri dosiahnutí 300 °C na termočlánku umiestnenom na okne v spálni a okne v kuchyni (oproti dverám zo spálne).

Odvetranie priestoru do susednej miestnosti spôsobené zničením dverí pri požiaroch bolo nastavené pre teplotu vznietenia dubového dreva, ktoré sa vo všeobecnosti udáva pri teplote 400 – 410 °C.

Prehľad jednotlivých požiarnych scenárov, spolu s priradeným iniciačným zdrojom, parametrami odvetrania a druhom podlahovej krytiny je uvedený v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Prehľad riešených požiarnych scenárov

| Požiarne scenár č. | Druh stavby | Miesto vzniku | Druh materiálu | Druh iniciátora | Scenár odvetrania |
|--------------------|-------------|---------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 1                  | 1 NP        | kuchyňa       | drevo          | olej            | 1                 |
| 2                  | 1 NP        | kuchyňa       | drevo          | olej            | 2                 |
| 3                  | 1 NP        | spálňa        | syntetika      | ohrievač        | 1                 |
| 4                  | 1 NP        | spálňa        | syntetika      | ohrievač        | 2                 |

Pri požiaroch kuchynskej linky v kuchyni sa uvažovalo už od začiatku vzniku požiaru so zatvorenými dverami do spálne a obývačky, ostatné dvere zostali otvorené.

Pri požiaroch matraci v spálni boli stále zatvorené len dvere vedúce zo spálne do kúpeľne a do kuchyne.

Dĺžka trvania simulácie trvania požiaru bola nastavená na 600 s. Posudzované a navzájom porovnávané boli parametre týkajúce rozvoja požiaru od fázy vzniku požiaru až po dosiahnutie fázy plne rozvinutého požiaru.

Na základe dosiahnutých výsledkov modelovania bola následne analyzovaná pozícia rozhrania medzi horúcou hornou vrstvou a dolnou chladnou vrstvou sploďín horenia v jednotlivých posudzovaných miestnostiach, posudzoval sa aj vplyv odvetrania na vývoj teploty v hornej (horúcej) teplotnej zóne v miestnosti (vo výške 2,4 m). Okrem toho bola posudzovaná aj výška zadymenia v miestnosti, vplyv teploty vznikajúcej pri požiaroch na okolité predmety situované v miestnosti, hmotnostná rýchlosť odhorievania paliva v nachádzajúceho sa v miestnosti, zmena koncentrácie kyslíka. Na základe zistených údajov a vizualizácie priebehu požiaru v prostredí SmokeView boli popísané aj parametre smeru šírenia tepla a sploďín horenia z miestnosti, v ktorej vznikol požiar do okolitých miestností.



### **5.1.3 Nastavenie výpočtovej domény**

Ešte pred samotnou tvorbou modelov stavieb bolo potrebné nastaviť výpočtovú doménu, t. j. veľkosť mriežky (angl. mesh) tvorenej sieťou štvorcových buniek. Od rozmerov mriežky, resp. počtu týchto buniek závisí priestorové rozlíšenie dynamiky prúdenia. Toto rozlíšenie má však vplyv na časovú náročnosť výpočtov. To znamená, že čím je priestorové rozlíšenie mriežky použitej pre výpočty vyššie (väčší počet buniek), tým dlhší bude samotný výpočtový čas.

Preto sa odporúča voliť veľkosť a priestorové rozlíšenie mriežky vo výpočtoch s ohľadom na cieľ modelovania, požadovanú správnosť výsledkov a čas potrebný na ich získanie.

Vo všeobecnosti však existuje viacero spôsobov pre stanovenie vodného priestorového rozlíšenia a veľkosti mriežky. Zvyčajne sú založené na hľadaní „ideálneho“ rozlíšenia, a to formou zvyšovania priestorového rozlíšenia pôvodnej mriežky až po rozlíšenie, pri ktorom sa priebehy jednotlivých kriviek približujú a ďalšie zvyšovanie rozlíšenia by nevedlo k ďalšiemu významnejšiemu zlepšovaniu výsledkov.

Priestorové rozlíšenie výpočtovej mriežky bolo pri všetkých tu modelovaných požiarnych scenároch nastavené konštantne na 10 cm. Toto nastavenie vychádzalo z výsledkov práce Mózerovej (2009), ktorá sa vo svojej práci okrem iného venovala aj stanoveniu vhodného priestorového rozlíšenia (hustoty) výpočtovej mriežky. Vo svojej práci porovnávala výsledky troch simulácií toho istého výpočtu, avšak pri rozdielnom priestorovom rozlíšení výpočtovej mriežky (5 cm, 10 cm a 20 cm). Porovnanie dosiahnutých výsledkov pri čase výpočtu 100 s preukázalo, že pri priestorovom rozlíšení mriežky 5 cm a 10 cm boli výsledky výpočtov takmer zhodné, rozdiely boli evidentné len v dĺžke výpočtového času, ktorý bol pri rozlíšení mriežky 5 cm približne 27 h, pričom pri rozlíšení 10 cm klesol na 100 min. Pri výpočtoch s mriežkou, ktorá mala priestorové rozlíšenie 20 cm boli výsledky veľmi odlišné od predchádzajúcich dvoch, avšak výpočtový čas klesol na 4 min.

### **5.1.4 Tvorba objektov modelu stavby**

Jednotlivé časti stavby (obvodové múry, priečky), ale aj okná, podlahová krytina, omietky, obklady a zariadenie interiéru stavby (objekty stavby) boli v prostredí PyroSim zadávané prostredníctvom modulov „Obstruction“ (slov. prekážka), „Hole“ (slov. otvor) a „Vent“ (slov. vetrací otvor), v ktorých boli jednotlivým objektom definované rozmery, ich umiestnenie v priestoroch stavby.

Pomocou modulu „Obstruction“ boli vytvárané objekty typu obvodové steny, priečky obklady a všetko zariadenie interiéru stavby. Týmto boli ďalej priradené príslušné limitné hodnoty pre ich povrch.

Modul „Hole“ bol použitý pri tvorbe dverí. Pri použití tohto modulu je pri vytváraní otvoru, tento otvor buď odstránený (vyrezaný) z pôvodného objektu (napr. okno alebo dvere v obvodovej stene alebo priečke) alebo je možné otvor vytvoriť a odstrániť ho v predpísanom čase alebo dosiahnutí predpísanej teploty. Vytvorený otvor však nemá žiadny vplyv na na hranice výpočtovej domény alebo na prípadne navrhnutý vetrací otvor.

Modul „Vent“ bol použitý na tvorbu okien a definovanie podmienok pre odvetranie stavby. Vetracie otvory sa pritom predpisujú len pre roviny priľahlé k predmetom alebo vonkajším stenám.

Rozmery jednotlivých miestností stavby a objektov sú uvedené v tabuľkách 3 a 4.

Tabuľka 3 Rozmery jednotlivých miestností modelovej stavby

| Miestnosť     | x (m) | y (m) | z (m) | Plocha (m <sup>2</sup> ) |
|---------------|-------|-------|-------|--------------------------|
| Spálňa        | 3,90  | 4,50  | 3,00  | 17,55                    |
| Kuchyňa       | 6,45  | 2,70  | 3,00  | 17,42                    |
| Obývacía izba | 2,70  | 7,45  | 3,00  | 20,12                    |
| Kúpeľňa       | 2,25  | 4,50  | 3,00  | 10,13                    |
| Chodba        | 9,40  | 1,70  | 3,00  | 15,98                    |

Tabuľka 4 Rozmery jednotlivých objektov interiérového vybavenia modelovej stavby

| Nadzemné podlažie | Miestnosť     | Zariadenie             | x (m) | y (m) | z (m) | Plocha (m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|---------------|------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|
| 1 NP              | Spálňa        | Posteľ                 | 2,20  | 2,40  | 0,30  | 5,28                     |
|                   |               | Matrac                 | 1,60  | 1,80  | 0,20  | 2,88                     |
|                   |               | Nočný stolík           | 0,60  | 0,60  | 0,60  | 0,36                     |
|                   |               | Sedačka                | 1,00  | 1,60  | 1,20  | 1,60                     |
|                   |               | TV prijímač            | 0,03  | 1,00  | 0,60  | 0,60                     |
|                   |               | Laminátová podlaha     | 3,90  | 4,50  | 0,05  | 17,55                    |
|                   | Kuchyňa       | Kuchynská linka spodok | 2,45  | 0,90  | 1,50  | 2,21                     |
|                   |               | Kuchynská linka vrch   | 2,45  | 0,40  | 0,90  | 0,98                     |
|                   |               | Chladnička             | 0,60  | 0,60  | 2,30  | 0,36                     |
|                   |               | Kuchynský stôl         | 3,00  | 1,00  | 0,96  | 3,00                     |
|                   |               | Stolička               | 0,50  | 0,40  | 0,76  | 0,20                     |
|                   |               | Laminátová podlaha     | 6,45  | 2,70  | 0,05  | 17,42                    |
|                   | Obývacía izba | Sedacia súprava        | 2,40  | 3,30  | 0,90  | 7,92                     |
|                   |               | Kreslo                 | 0,90  | 1,20  | 0,90  | 1,08                     |
|                   |               | TV prijímač            | 0,04  | 1,30  | 0,80  | 1,04                     |
|                   |               | Komoda                 | 1,20  | 0,60  | 1,20  | 0,72                     |
|                   |               | Konferenčný stolík     | 0,60  | 1,50  |       |                          |
|                   |               | Laminátová podlaha     | 2,70  | 7,45  | 0,05  | 20,12                    |

Pokračovanie tabuľky 4 Rozmery jednotlivých objektov interiérového vybavenia modelovej stavby

| Nadzemné podlažie | Miestnosť | Zariadenie         | x (m) | y (m) | z (m) | Plocha (m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------------|
| 1NP               | Kúpeľňa   | Vaňa               | 0,70  | 1,90  | 0,60  | 1,33                     |
|                   |           | Toaleta            | 0,55  | 0,80  | 0,30  | 0,44                     |
|                   |           | Umývadlo           | 0,40  | 0,55  | 0,15  | 0,22                     |
|                   |           | Práčka             | 0,45  | 0,70  | 0,90  | 0,32                     |
|                   |           | Laminátová podlaha | 2,25  | 4,50  | 0,05  | 10,13                    |
|                   | Chodba    | Botník             | 1,00  | 0,30  | 1,00  | 0,30                     |
|                   |           | Šatníková skriňa   | 5,00  | 0,70  | 3,00  | 3,50                     |
|                   |           | Laminátová podlaha | 9,40  | 1,70  | 3,00  | 15,98                    |

Rozmier okien situovaných v modelovej stavbe bol 0,3 x 1,0 x 1,2 m. Rozdielne rozmery, 0,3 x 1,5 x 1,2 m, mali len okná v spálni.

Jednotlivým objektom modelovej stavby, po ich vytvorení, bol prostredníctvom modulu „Edit Materials“ priradený typ materiálu (pevná látka), pričom bolo potrebné špecifikovať jeho fyzikálne a termické vlastnosti. Ich prehľad je uvedený v tabuľke 5.

Tabuľka 5 Termické vlastnosti materiálov použitých v modelovej stavbe

| Druh materiálu | Hustota               | Tepelná kapacita                        | Tepelná vodivosť                      | Emisivita | Absorpčný koeficient | Spaľovacie teplo       |
|----------------|-----------------------|---|---------------------------------------|-----------|----------------------|------------------------|
|                | (kg·m <sup>-3</sup> ) | (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |           | (m <sup>-1</sup> )   | (kJ·kg <sup>-1</sup> ) |
| betón          | 2 280,00              | 1,04                                    | 1,80                                  | 0,94      | 0,0005               | –                      |
| dubové drevo   | 750,00                | 2,00                                    | 0,17                                  | 0,89      | 0,0005               | 19 822,00              |
| bavlnená látka | 641,00                | 1,34                                    | 0,04                                  | 0,77      | 0,0005               | 16 770,00              |
| PUR pena       | 28,00                 | 1,30                                    | 0,03                                  | 0,91      | 0,0005               | 28 463,00              |
| PVC            | 1 400,00              | 1,67                                    | 0,03                                  | 0,93      | 0,0005               | –                      |
| keramika       | 3980,00               | 0,87                                    | 24,00                                 | 0,09      | 0,0005               | –                      |
| omietka        | 1 440,00              | 0,84                                    | 0,48                                  | 0,91      | 0,0005               | –                      |
| sklo           | 2500,00               | 0,84                                    | 1,05                                  | 0,84      | 0,0005               | –                      |

Každému druhu materiálu použitého v modelovej stavbe boli definované termické vlastnosti ako tepelná vodivosť  $\lambda$  (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), hustota  $\rho$  (kg·m<sup>-3</sup>), tepelná kapacita  $c$  (kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), emisivita, absorpčný koeficient (m<sup>-1</sup>) a pri niektorých materiáloch i spaľovacie teplo (kJ·kg<sup>-1</sup>). Tieto údaje boli získané experimentálnym zisťovaním v laboratóriách Drevárskej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene, ostatné údaje ako hustota, emisivita a absorpčný koeficient či vlastnosti betónu a keramických obkladov boli získané z databáz nameraných údajov pre rôzne druhy materiálov publikovaných na internete<sup>1</sup>.

Pri viaczožkových materiáloch boli doplnené parametre týkajúce sa termických vlastností ich jednotlivých komponentov (PUR pena, 100 % bavlnená látka).

<sup>1</sup> <http://webservice.dmt.upm.es> a <http://www.engineeringtoolbox.com>

### 5.1.5 Špecifikácia limitných podmienok pre objekty modelu stavby

Okrem definovania rozmerov boli pri jednotlivých objektoch (predmetoch) špecifikované limitujúce podmienky pre ich povrch.

Limitné podmienky pre povrch objektu boli špecifikované už pri tvorbe objektu, prostredníctvom modulov „Obstruction“, „Hole“ alebo „Vent“, a to konkrétne v záložke „Surface“ (slov. povrch) dialógového okna spomínaných modulov.

Každý objekt je vo všeobecnosti definovaný súradnicami jeho polohy vo vnútri výpočtovej domény (mriežky). Špecifikovaním limitných podmienok pre jeho povrch sa rozumie definovanie rozdielnych vlastností objektu na jeho povrchu (uvoľňovanie plynného paliva z povrchu pevnej látky, inertný, horúci, studený a pod.), pričom tieto môžu byť rozdielne pre jeho hornú stranu, bočné strany a spodnú stranu.

Vo všeobecnosti je možné definovať rozdielne vlastnosti objektu na jeho povrchu, stranách a spodku. To znamená, že daný objekt môže mať na každej strane iné hraničné vlastnosti (napr. horiaci, inertný, horúci, studený povrch).

Špecifikácia limitných podmienok pre jednotlivé objekty stavby a vybavenie jej interiéru musí byť vykonaná veľmi obozretne, nakoľko práve táto špecifikácia udáva, ako rýchlo sa materiály zahrievajú a ako horia.

V posudzovaných modeloch stavby sú jednotlivé objekty a ich materiálové zloženie tvorené ako prírodnými (drevo), tak i syntetickými materiálmi (matrace, sedacia úprava a pod.).

Pri špecifikácii limitných podmienok pre objekty (pevné látky) je potrebné brať do úvahy i skutočnosť, že tieto objekty (predmety) môžu pozostávať z hľadiska materiálnej skladby z viacerých druhov materiálov. Túto kombináciu materiálov, ich vrstiev, je potrebné definovať v module „Surface“. Pritom do modelovania je možné zahrnúť až 20 komponentov materiálov.

Pre špecifikáciu limitných podmienok pre vybrané povrchy objektov stavby, ktorých povrchom boli priradené limitné podmienky „burner“ boli použité údaje o rýchlosti uvoľňovania tepla na jednotku plochy daného materiálu (HRRPUA). Tieto údaje boli získané experimentálnym zisťovaním na kónickom kalorimetri v laboratóriu Ústavu integrovanej bezpečnosti Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave.

V prípade kompozitných materiálov sa stanovuje jedna hodnota HRRPUA, najčastejšie sa priradí HRRPUA materiálu, ktorý sa nachádza na povrchu objektu (kompozitu), avšak je možné

priradiť aj jednu, najvyššiu hodnotu HRRPUA, spomedzi posudzovaných komponentov materiálového zloženia daného objektu (predmetu).

Prehľad jednotlivých objektov s priradeným druhom materiálu a priradenými limitnými podmienkami povrchu materiálov je uvedený v tabuľke 6.

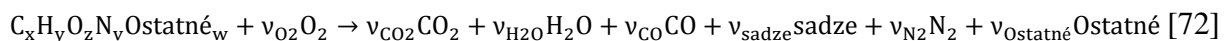
Tabuľka 6 Limitné podmienky materiálov

| Materiál     | HRRPUA (kW·m <sup>-2</sup> ) |
|--------------|------------------------------|
| Drevo dubové | 2 250                        |
| Sklo         | 500                          |
| PVC          | 210                          |
| PUR pena     | 3 120                        |
| Betón        | 1 000                        |
| Omietka      | 100                          |

V odbornej literatúre sme okrem týchto materiálov našli aj hodnoty HRRPUA aj pre TV prijímač (930 kW·m<sup>-2</sup>), pre matrac (527 kW·m<sup>-2</sup>) a pre chladničku (1 921 kW·m<sup>-2</sup>). Tieto sme však v modelovaní neaplikovali.

### 5.1.6 Nastavenie parametrov procesu horenia

Vo všeobecnosti je možné si voliť medzi dvomi spôsobmi modelovania horenia. Prvým je rýchlosť uvoľňovania tepla na jednotku plochy (HRRPUA) a druhým je špecifikácia reakčného tepla. Obidva založené na aplikácii zmiešavacieho frikčného modelu. Pri použití zmiešavacieho frikčného modelu sa predpokladá, že každá reakcia má formu [72]



To znamená, že je potrebné len definovať chemický vzorec paliva spolu s výťažkami oxidu uhoľnatého (CO), sadzí, vodíka (H<sub>2</sub>) a množstvo vodíka v sadzi. Pre kompletnosť možno doplniť aj údaje o obsahu dusíka (N<sub>2</sub>) či ďalších vyskytujúcich sa zložiek.

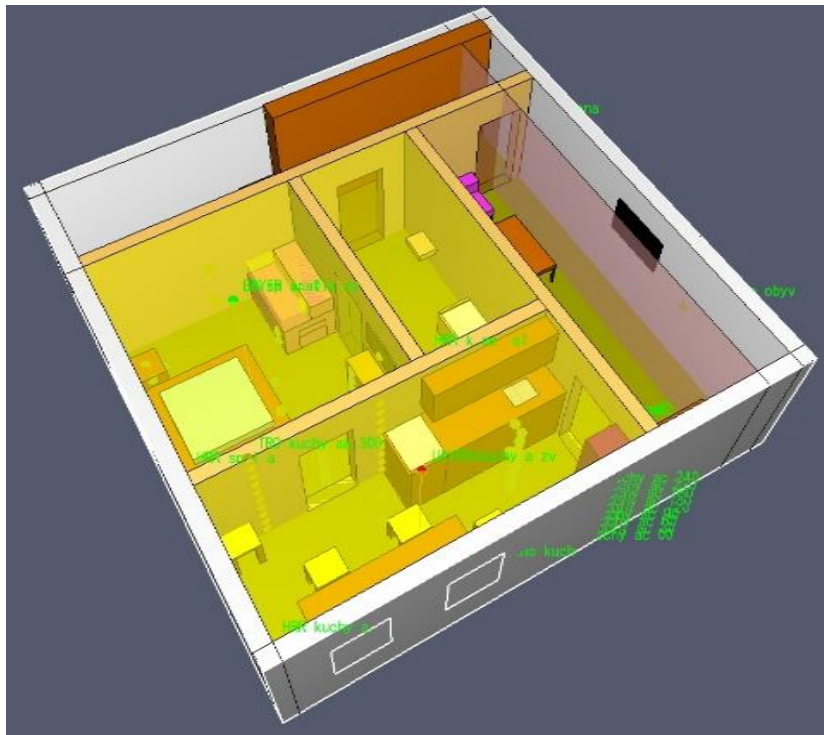
Pre simuláciu horenia v nami riešených požiarňach scenároch bola zvolená voľba definovanie HRRPUA (kW·m<sup>-2</sup>) s využitím hodnôt uvedených v tabuľke 6.

### 5.1.7 Výber a lokalizácia detekčných zariadení

Po vypracovaní modelov stavieb boli do každej z nich umiestnené detektory pre zaznamenanie vybraných parametrov požiaru (teplota, rýchlosť odhorievania, rýchlosť uvoľňovania tepla v miestnosti, identifikácia teplotných zón vznikajúcich pri požari a meranie koncentrácie kyslíka (O<sub>2</sub>).

V prvom rade išlo o definovanie umiestnenia termočlánkov (modul „Thermocouple“). Jednotlivé termočlánky boli umiestnené na stene vo všetkých miestnostiach zahrnutých do modelovania, vybraných oknách určených pre nastavenie parametrov pre odvetranie priestoru v čase požiaru. v zmysle definovaného požiarneho scenáru. Otvárali sa, resp. došlo k rozbitiu ich sklenenej výplne, pri dosiahnutí teploty 300 °C na príslušnom termočlánku. Zadávanie týchto podmienok bolo vykonané prostrednítvom modulu „Control“.

Lokalizáciu jednotlivých detektorov priestore stavby prezentuje obrázok 46.



Obrázok 46 Lokalizácia snímačov parametrov požiaru v jednopodlažnej stavbe

Vo vybraných miestnostiach stavby boli rozmiestnené tiež snímače na bodové zaznamenávanie koncentrácie kyslíka (O<sub>2</sub>). Tieto boli umiestnené v zmysle už spomínaných schém (obrázok 46) vo výške 2,4 m do stredu miestnosti. Pre ich tvorbu bol využitý modul „Gas Phase Device“.

Modul „Heat Release Rate Device“ bol použitý na meranie rýchlosti uvoľňovania tepla pre špecifický objem. Vo výpočtoch sa uvažovala so stanovením rýchlosti uvoľňovania tepla pre každú z miestností modelovej stavby. Predmetom skúmania bol aj výskum rýchlosti uvoľňovania tepla jednotlivých predmetov v miestnosti.

Pre odhad pozície rozhrania medzi horúcou hornou vrstvou a dolnou chladnou vrstvou splodín horenia v jednotlivých posudzovaných miestnostiach bol aplikovaný modul „Layer Zoning Device“. Na rozdiel od dvojzónových modelov požiaru CFD modely požiaru, akým je aj FDS

nerozlišuje medzi dvomi zónami, ale vytvára priebežný profil teploty. Konkrétne FDS používa pre odhad výšky a priemernej teploty hornej a dolnej vrstvy algoritmus založený na integrácii pozdĺž línie. V tomto prípade sme sa rozhodli túto líniu viesť po výške kolmo na stred miestnosti.

Posledným z detektorov, ktorý bol situovaný do každej z miestností modelovej stavby bol detektor tepla (modul „Heat Detector“). Tento zaznamenáva teplotu v miestnosti. Tento bol umiestnený pod strop v strede miestnosti.

Tu je potrebné na záver poznamenať, že prostredie PyroSim je len grafickým užívateľským rozhraním požiarneho modelu FDS. Všetky zadávané údaje sú priamo zapisované do FDS súboru, vytváraného na pozadí PyroSim. Vytvorený FDS súbor je zároveň vstupným súborom do simulácie a vizualizácie výsledkov v prostredí SmokeView. Ten sa využíva len na grafickú vizualizáciu výsledkov modelovania. Viac informácií o priebehu analyzovaných premenných ponúkajú excelové súbory generované priamo prostredím FDS. Na základe týchto údajov sú v prostredí MS Excel spracované numerické informácie do podoby grafov.

### **5.3. Výsledky modelovania požiarneho scenára**

#### **5.1.8 Výsledky modelovania požiaru v kuchyni**

Požiar v kuchyni vznikol vplyvom vznietenia vriaceho oleja na panvici ponechanej na zapnutej indukčnej varnej doske s výkonom 20 kW. Tá po čase spôsobila vznietenie kuchynskej linky.

V modelovaní sa uvažovalo s dvomi požiarne scenármi, ktoré sa medzi sebou líšili v spôsobe odvetrania priestoru prostredníctvom otvárania a zatvárania okien v zmysle dosiahnutia vopred definovaného kritéria (teplota na termočlánku umiestnenom na okne dosiahne hodnotu 300 °C). Obidva uvažované požiarne scenáre počítali s tým, že dvere vedúce do spálne a obývacej izby zostanú zatvorené. Testované bolo aj prípadné prehorenie dverí vedúcich do obývacej izby, pokiaľ teplota v miestnosti dosiahne 400 °C, čo je teplota vznietenia dubového dreva, z ktorého tieto dvere boli vyhotovené.

V prvom požiarne scenári sa s odvetraním priestoru prostredníctvom okien neuvažovalo. S ich otvorením sa uvažovalo len v druhom požiarne scenári.

Modelovanie bolo uskutočnené s cieľom ďalšieho štúdia časového priebehu vybraných parametrov požiaru.

Na základe situovania detektorov určených pre zaznamenávanie vybraných parametrov požiaru boli ako výsledok modelovania získané nasledovné údaje o požiaroch: rýchlosť uvoľňovania tepla na jednotku objemu (HRRPUV), ktorým bola celá miestnosť (kuchyňa), priebeh teploty v hornej vrstve, výška vrstvy dymu v miestnosti v čase trvania požiaru, hmotnostná rýchlosť odhorievania paliva v nachádzajúceho sa v miestnosti, a tiež koncentrácia kyslíka v priestore.

Ďalej sú uvedené výsledky spracovania údajov modelovania pre obidva požiarne scenáre. Na ich spracovanie bol použitý počítačový program MS Excel 2013. Grafické výstupy z prostredia SmokeView sú uvedené v Prílohe 1 tejto monografie.

Dôležitým časovým intervalom z hľadiska vyhodnocovania výsledkov bol čas dosiahnutia vrcholu normalizovanej teplotno-časovej krivky. Pre vybrané veličiny je ich priebeh vyhodnocovaný pre celý časový interval trvania požiaru, t. j. 600 s.

Na obrázku 47 je uvedený priebeh krivky reprezentujúcej rýchlosť uvoľňovania tepla (HRRPUV) v priestore kuchyne počas celej sledovanej doby trvania požiaru.

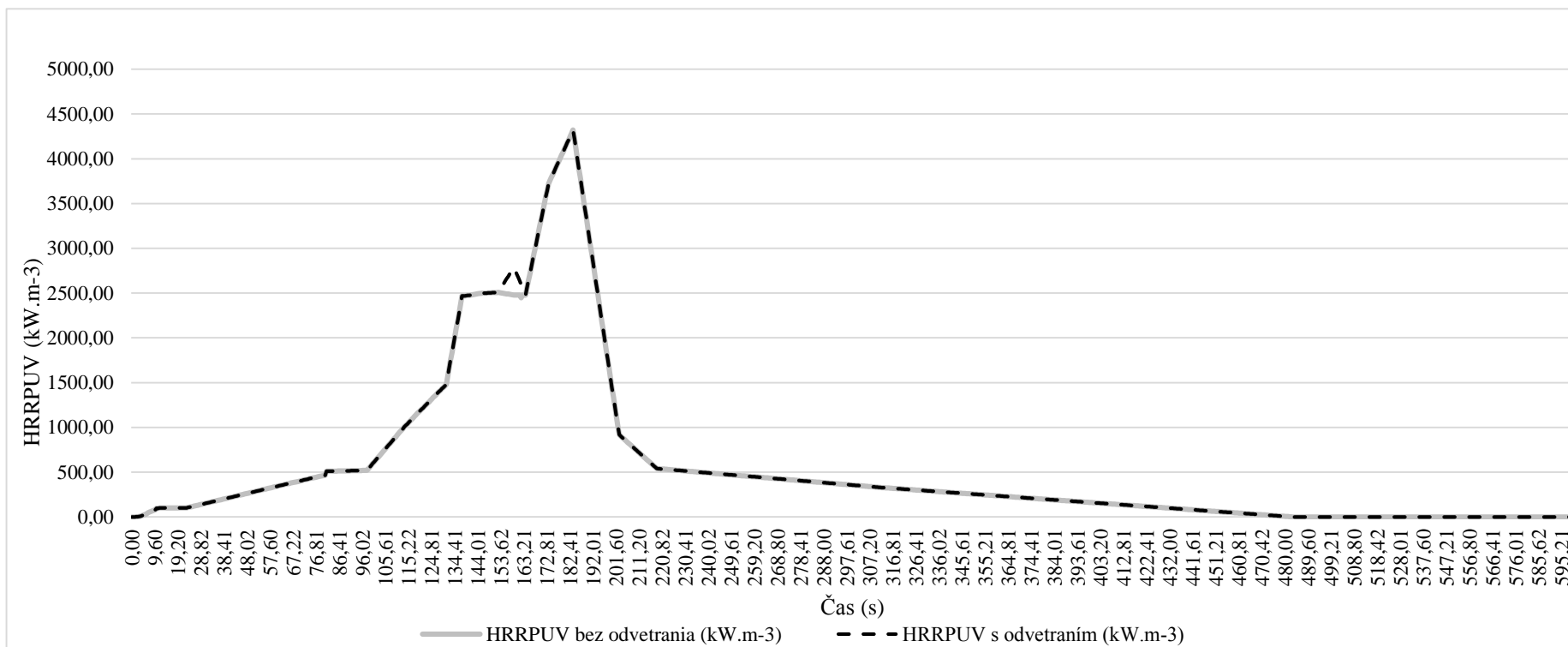
Ako je vidieť z priebehu obidvoch kriviek HRRPUV, odvetranie priestoru otvorením jedného z okien na kuchyni (72 s) vplyvom narastajúcich teplôt v miestnosti sa prejavilo aj na zvýšenej hodnote HRRPUV a to konkrétne v časovom intervale 140 – 175 s. V scenári sa predpokladalo, že postupne sa vznietili a horeli obidve časti kuchynskej linky (horná i dolná skrinka).

Modelovaný požiar v kuchyni dosiahol svoje vrcholové štádium fázy plne rozvinutého požiaru približne v 180 s ( $HRRPUV = 4\,322,20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Potom nasledoval v priestoroch kuchyne postupný nástup fázy uhasínania požiaru.

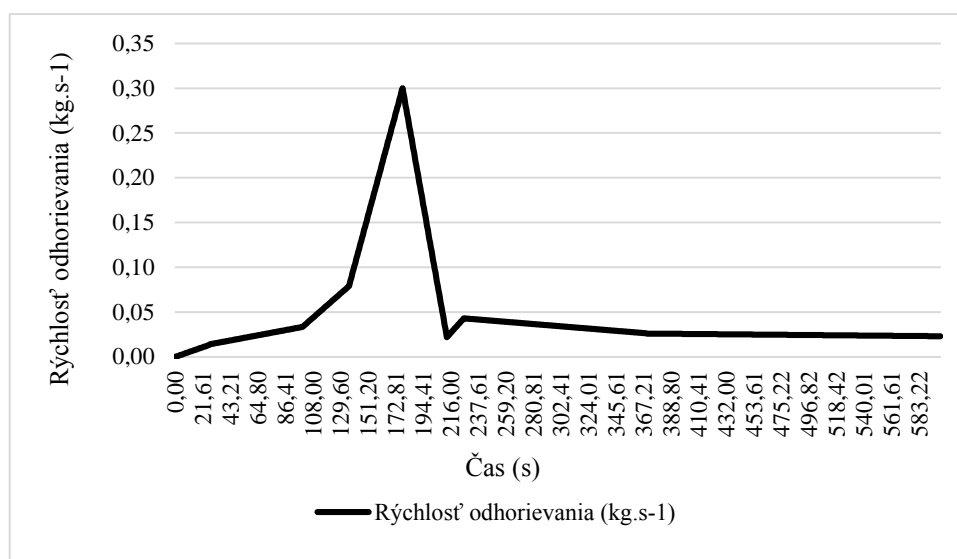
Vo všeobecnosti platí, že rýchlosť uvoľňovania tepla sa mení s časom v závislosti od tepla splyňovania paliva a je priamo úmerná rýchlosti odhorievania.

Priebeh vývoja hodnôt rýchlosti odhorievania paliva je uvedený na obrázku 48.





Obrázok 47 Priebeh vývoja hodnôt rýchlost' uvoľňovania tepla (HRRPUV) v priestore kuchyne

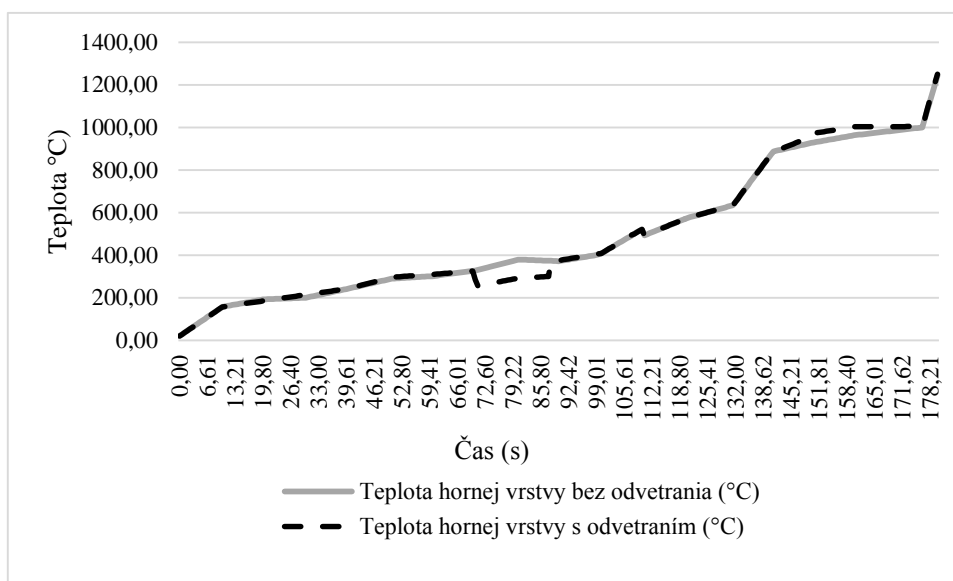


Obrázok 48 Priebeh vývoja hodnôt rýchlostí odhorievania v priestore kuchyne

Ako vidíme z jej priebehu, kopíruje priebeh samotnej HRRPUV krivky.

Ďalej sú tu v grafickej forme prezentované i výsledky týkajúce sa priebehu hodnôt ďalších sledovaných parametrov: teplota hornej vrstvy tvorenej splodinami horenia, výška vrstvy dymu a koncentrácia  $O_2$  ( $h = 2,4$  m) v miestnosti prepočítaná na objemové %. Priebeh vývoja týchto parametrov počas požiaru je graficky znázornený len do okamihu dosiahnutia vrcholového štádia fázy plne rozvinutého požiaru, a to približne v 180 s. Ide o bod, v ktorom dosahujú sledované parametre najvyššie možné hodnoty, potom pozvoľna začínajú klesať až pokiaľ nenastane posledná fáza požiaru, jeho uhasnutie. To platí najmä pre správanie sa požiaru v uzavretej miestnosti, pokiaľ sa neuvažuje s jeho rozšírením do ďalších miestností, kedy by ďalší vývoj hodnôt týchto parametrov priamo závisel na podmienkach vznikajúcich v súvislosti s rozvojom požiaru vo vedľajšej miestnosti.

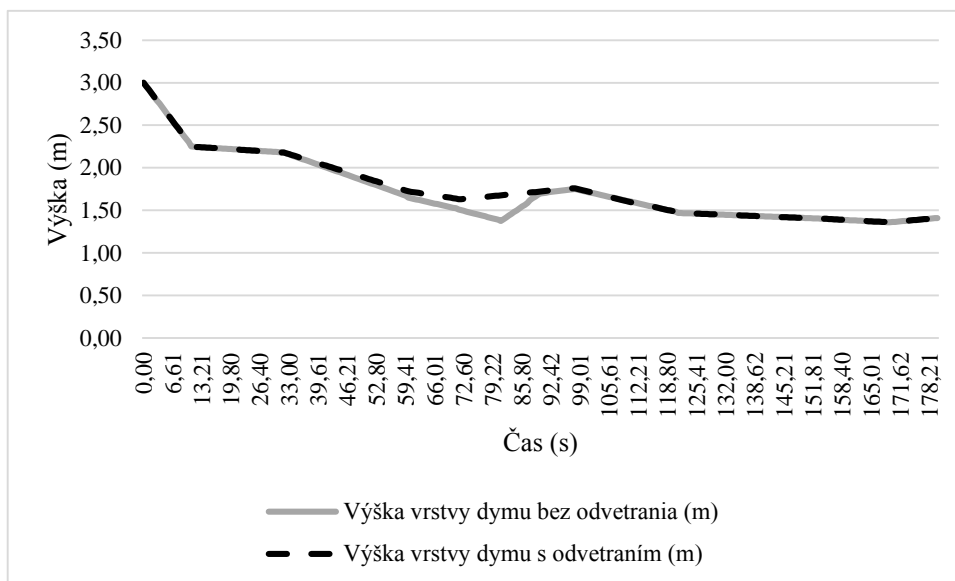
Na obrázku 49 sú prezentované výsledky priebehu vývoja teploty v hornej (horúcej) vrstve vzduchu v miestnosti. Tieto boli merané vo výške 2,4 m. Pritom výška celej miestnosti je 3,0 m.



Obrázok 49 Priebek vývoja hodnôt teploty hornej vrstvy v priestore kuchyne

Tieto krivky kopírujú priebek už prezentovaných kriviek HRRPUV a rýchlosti odhorievania. Konkrétne z tejto krivky je zrejmé, kedy došlo v kuchyni k javu nazývanému flashover. Vtedy už horel celý priestor kuchynskej linky a teplo sáhalo do okolia (cca 132 s). Z vizualizácie výsledkov v SmokeView (Príloha 1), ale aj vyhodnotenia údajov jednotlivých termočlánkov, je zrejmé, že požiar v tom čase dosahoval také parametre, že bol schopný zapáliť aj ostatný nábytok v kuchyni nachádzajúci sa oproti kuchynskej linke (stolička a časť kuchynského stola a v prípade prehorenia dvier spájajúcich kuchyňu s obývačkou tiež komodu v obývacej izbe, ktorá stojí v smere hlavného prúdu tepelného toku a splodín horenia riadených odvetraním. Tu je potrebné pripomenúť, že všetky tieto objekty (predmety) boli vyhotovené z dubového dreva, ktoré má tepotu vznietenia cca 400 °C (Zachar et al. 2017) a rýchlosť uvoľňovania tepla na jednotku plochy vo fáze plne rozvinutého požiaru bola 2 250 kW·m<sup>-2</sup>. Pokles hodnôt teploty pri požiarom scenári s odvetraním v časovom intervale približne 70 – 90 s poukazuje na otvorenie okna v miestnosti (okno bližšie k chladničke), nakoľko teplota na termočlánku dosiahla predefinovaných 300 °C. Z grafu je zrejmé, že teplota hornej vrstvy v miestnosti dosiahla svoju maximálnu hodnotu 1 246,21 °C pri požiarom scenári bez odvetrania a 1 251,16 °C pri požiarom scenári s odvetraním v priebehu 3 min, t. j. 180 s.

Ďalším sledovaným parametrom bola výška vrstvy dymu nachádzajúceho sa v miestnosti. Priebek vývoja týchto hodnôt dokumentuje obrázok 50. Pritom sledovaným parametrom bolo postupné vyplňanie priestoru dymom, t. j. postupné klesanie dymu od stropu k podlahe. Tieto údaje je možné využiť napr. aj pri plánovaní evakuácie osôb z horiacej budovy.

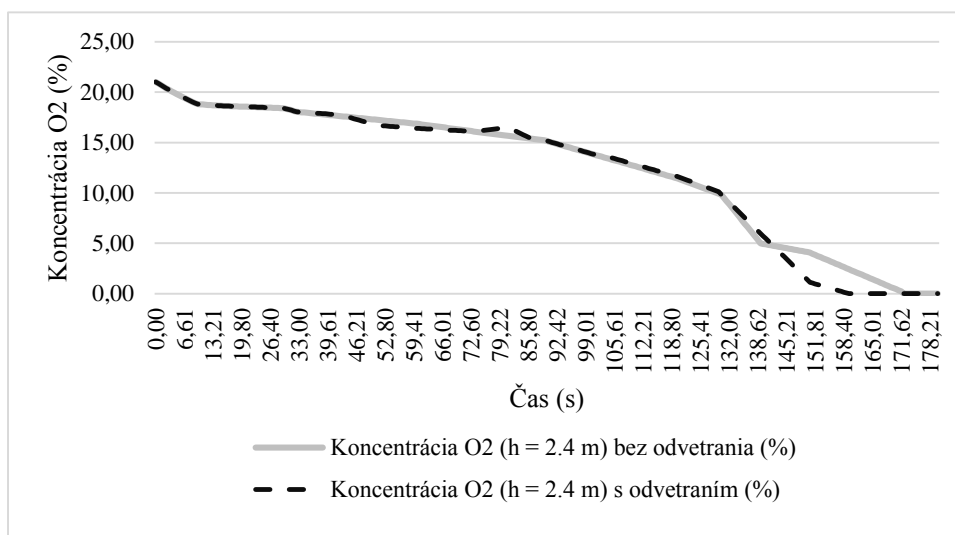


Obrázok 50 Priebeg vývoja hodnôt výšky vrstvy dymu v priestore kuchyne

Aj na priebehu tejto krivky je možné sledovať interval, kedy došlo k otvoreniu jedného z kuchynských okien a nasávaniu vzduchu z exteriéru. To zintenzívnilo horenie a zapríčinilo dočasné zvýšenie výšky rozhrania úmedzi zónou horúcich splođín horenia nachádzajúcich sa pod stropom a chladnejšieho vzduchu nasávaného z exteriéru, ktorý sa sa nachádzal v zóne bližšie ku podlahe.

Ďalšími sledovanými parametrami boli koncentrácia plynov v miestnosti v čase od vzniku požiaru až po dosiahnutie vrcholu fázy plne rozvinutého požiaru, t. j. 180 s.

Na obrázku 51 je možné sledovať priebeh vývoja koncentrácie kyslíka počas požiaru.



Obrázok 51 Priebeg vývoja hodnôt koncentrácie kyslíka v priestore kuchyne

Ako je z obrázku zrejme, koncentrácia kyslíka postupne klesala z pôvodnej hodnoty 21 % až na minimálne množstvá. Pričom túto hranicu dosiahla pri požiarom scenári bez odvetrania až po 170 s, zatiaľ čo scenári s odvetraním už v 160 s.

Význam sledovania parametra koncentrácia kyslíka je zrejme najmä z požiarneho scenára „s odvetraním“. V prípade tohto scenára ide o požiar riadený ventiláciou (odvetraním). Postupné klesanie koncentrácie kyslíka, ktoré nastáva vo fáze plne rozvinutého požiaru, spôsobuje nedostatok kyslíka na horenie produktov pyrolýzy, ktoré vznikajú z dôvodu zvyšovania sa teploty v priestore. Na zmenu parametrov vnútorného požiaru má vtedy dominantný vplyv najmä vzduch prúdiaci otvormi.

### **5.3.2. Výsledky modelovania požiaru v spálni**

V prípade požiarnych scenárov, pri ktorých miestom vzniku požiaru bola spáľňa, boli posudzované tie isté parametre ako pri požiaroch v kuchyni.

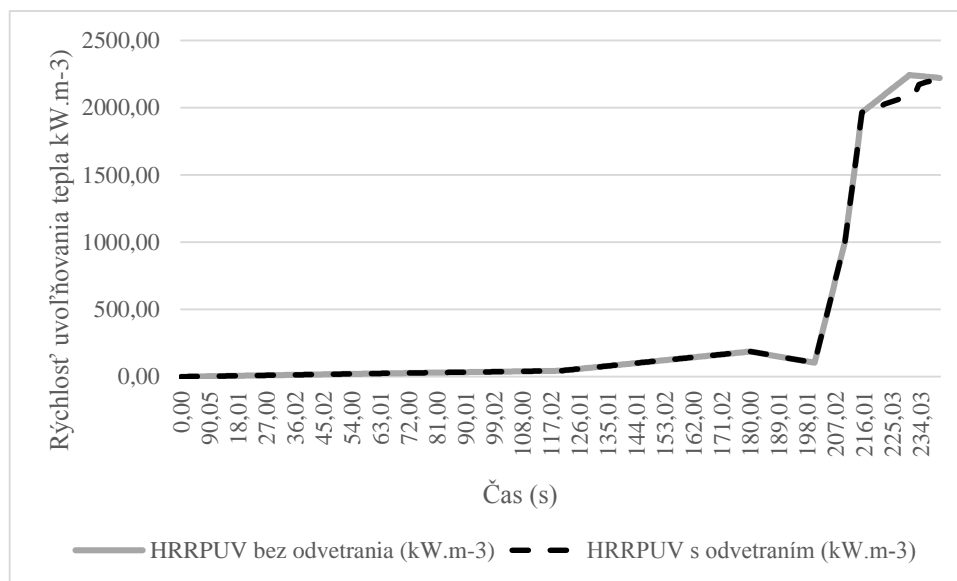
V prípade tohto požiaru sa zmenili len vstupné parametre, najmä hodnota HRRPUA ( $3\,120,00\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ), nakoľko požiar vznikol vznietením matracu na posteli, ktorý bol po dlhší čas vystavený poškodenému ohrievaču, ktorý do priestoru vyžaroval teplotu cca  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pre nastavenie parametrov odvetrania prostredníctvom okna platili tie isté parametre ako v predchádzajúcich požiaroch. Odvetranie priestoru bolo riešené len prostredníctvom otvorenia okna. Zavreté boli len dvere vedúce do kuchyne a do kúpeľne.

Počas požiaru došlo k flashover, pri ktorom sa vznietili aj ostatné súčasti vybavenia izby.

Požiar dosiahol vrcholné štádium fázy plne rozvinutého požiaru v čase cca 240 s. Pre tento časový úsek boli vyhodnocované aj parametre týkajúce sa rýchlosti uvoľňovania tepla na jednotku objemu (HRRPUV), rýchlosti odhorievania, teploty hornej vrstvy, výšky vrstvy dymu a koncentrácie kyslíka v miestnosti počas trvania požiaru.

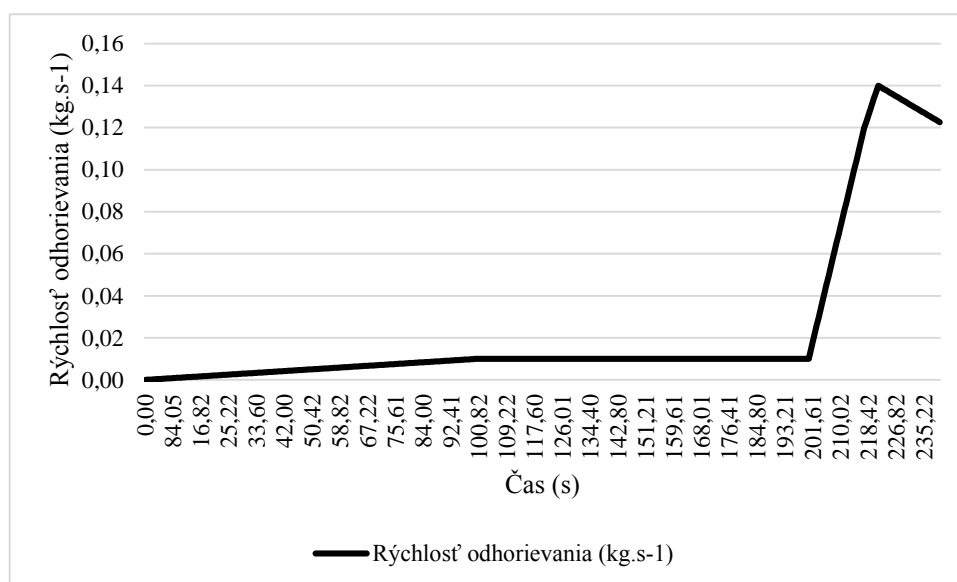
Na obrázku 52 je uvedený priebeh vývoja HRRPUV hodnôt. Ide o hodnoty rýchlosti uvoľňovania tepla odvodené pre celú miestnosť (spáľňu).



Obrázok 52 Priebek vývoja hodnôt rýchlostí uvoľňovania tepla (HRRPUV) v priestore spálne

Ako je vidieť z priebehu krivky požiar sa začal vyvíjať veľmi pomaly. Rápidny nárast rýchlosti uvoľňovania tepla nastal približne až v 200 s trvania požiaru, kedy matrac, ktorý spočiatku len tlel začal horieť plameňom. Maximálny nárast rýchlosti uvoľňovania tepla nastal v cca 240 s, kedy tento parameter nadobúdala hodnotu  $2\,221,46\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Ako už bolo spomenuté vyššie hodnoty HRRPUV sú priamo závislé na rýchlosti odhorievania paliva v miestnosti. Aj v tomto prípade platí posledne popísaný priebeh rozvoja požiaru. Priebeh vývoja rýchlostí odhorievania je uvedený na obrázku 53.



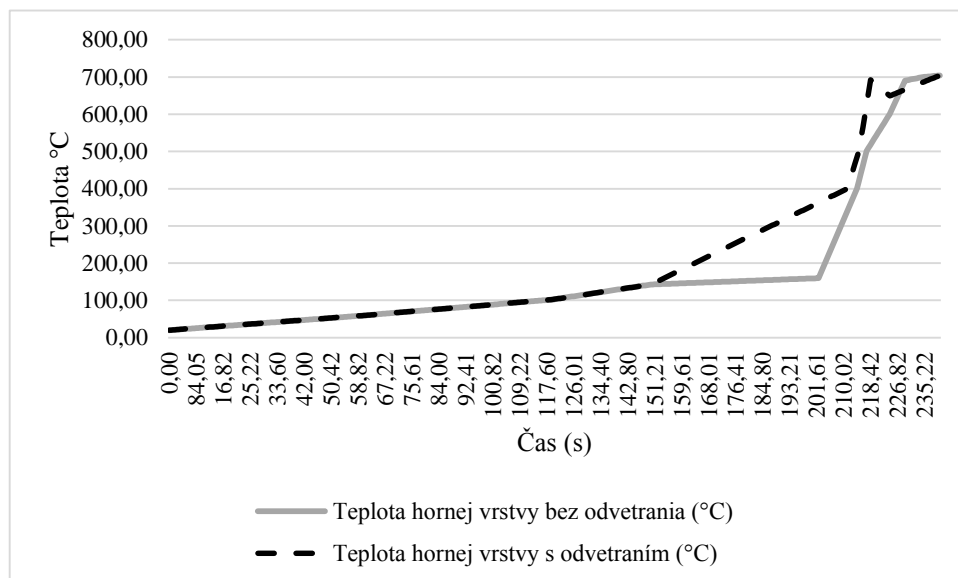
Obrázok 53 Priebek vývoja hodnôt rýchlosti odhorievania paliva v priestore spálne

Z priebehu vývoja hodnôt rýchlosti odhorievania je zrejme, že najvyššia hodnota rýchlosti uvoľňovania tepla bola dosiahnutá v 221 s, kedy tento parameter dosahoval hodnotu

0,139 kg·s<sup>-1</sup>. Následne, najmä z dôvodu úbytku dostupného paliva v miestnosti, zmenila krivka svoj priebeh a mala klesajúci trend.

Obrázok 54 dokumentuje priebeh vývoja hodnôt teploty hornej vrstvy pri požiari. Krivka, ktorá vznikla na základe výsledkov modelovania požiarneho scenára, v ktorom sa neuvažovalo s odvetraním miestnosti prostredníctvom otvorenia okna v čase, keď teplota na termočlánku umiestnenom na okne dosiahne hodnotu 300 °C, sa zhoduje s priebehom krivka HRRPUV. Iný priebeh krivky je zrejmy v prípade výsledkov modelovania požiarneho scenára, ktorý uvažoval s odvetraním prostredníctvom okna.

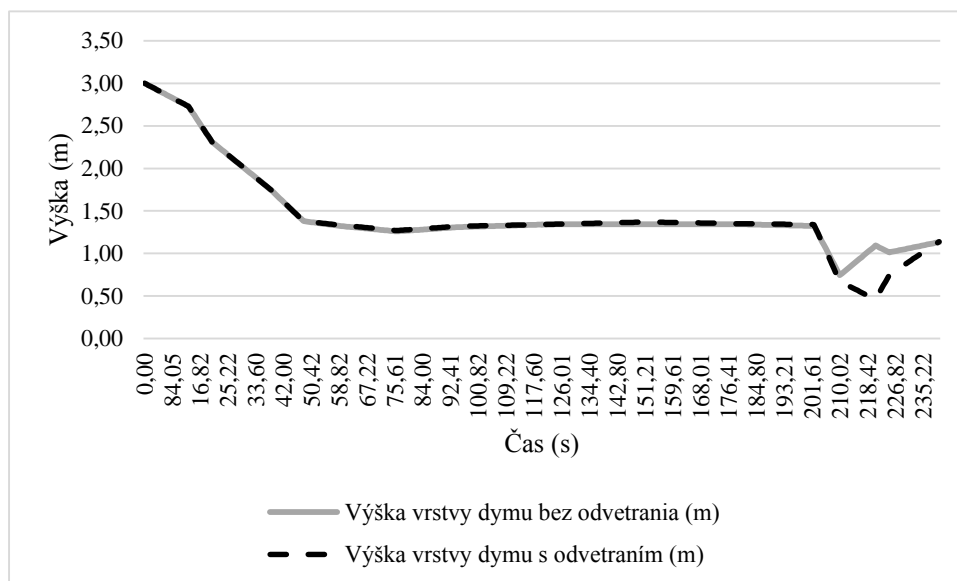
Tu je zrejmy nárast teploty oproti predchádzajúcemu scenáru a to už približne od 150 s. Tento vývoj predznamenáva neskoršie otvorenie okna a vznik flashover, priestorového vzplanutia materiálu v miestnosti). V prípade požiarneho scenára „bez odvetrania“ nastal flashover v priestore spálne v 214 s trvania požiaru ( $T = 500,13$  °C), zatiaľ čo v prípade požiarneho scenára „s odvetraním“ flashover nastal v priestore v čase 211 s ( $T = 416,65$  °C). Vznik flashover spôsobil vznietenie aj ostatného nábytku v miestnosti. Vizualizácia výsledkov modelovania v prostredí SmokeView poukázala na fakt, že ako prvý sa vznietil nočný stolík (pri posteli vpravo), následne druhý nočný stolík, sedačka umiestnená oproti posteli a potom aj TV prijímač (plast) a komoda.



Obrázok 54 Priebeh vývoja hodnôt teploty hornej vrstvy v priestore spálne

Ďalším sledovaným parametrom bola výška vrstvy dymu nachádzajúceho sa počas požiaru v priestore spálne. Vývoj priebehu hodnôt výšky vrstvy dymu v priestore spálne počas požiaru dokumentuje obrázok 55. Z priebehu oboch kriviek je zrejmy rozdiel v ich vývoji v čase vzniku flashover a otvorenia okna pri požiarom scenári „s odvetraním“. Odvetranie priestoru malo aj

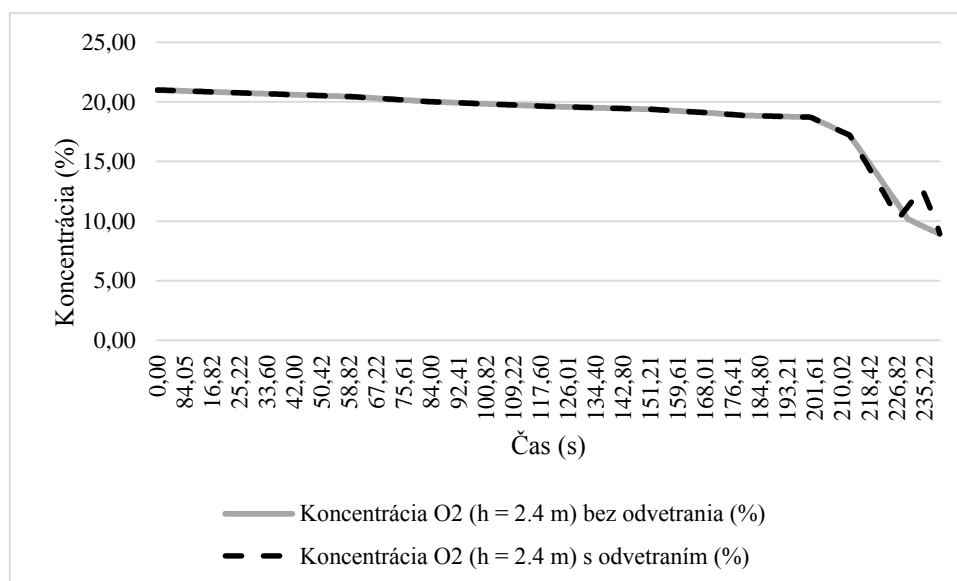
v tomto prípade významný vplyv na zmenu výšky rozhrania medzi horúcou zónou spalín horenia a chladnejšou zónou tvorenou najmä prúdiacim vzduchom z vonku cez otvorené okno spálne.



Obrázok 55 Priebek vývoja hodnôt výšky vrstvy dymu v priestore spálne

Najväčšie rozdiely v oboch požiarnych scenároch vznikli v čase, keď v miestnosti došlo k vzniku flashover. Horúca zóna splodín horenia v tomto časovom intervale klesla až na úroveň 0,5 m nad podlahou.

Posledným skúmaným parametrom bola koncentrácia kyslíka v miestnosti. Tá bola zisťovaná vo výške 2,4 m prostredníctvom detektora situovaného v strede miestnosti. Výsledky tohto zisťovania sú uvedené na obrázku 56.



Obrázok 56 Priebek vývoja koncentrácie kyslíka v priestore spálne



Výsledky poukázali na rozdiel v koncentrácii kyslíka pri oboch posudzovaných požiarnych scenároch. Tento sa vyskytol v čase blízko dosiahnutia vrcholu fázy plne rozvinutého požiaru. Za príčinu tohto javu možno označiť práve vplyv odvetrania miestosti, ktoré nastalo v čase približne 210 s. Ako je z obrázku zrejmé, koncentrácia kyslíka postupne klesala z pôvodnej hodnoty 21 % až na úroveň približne 9 %.

#### **5.4. Formulácia záverov k výsledkom modelovania vnútorných požiarov**

Výsledky prezentované v tejto monografii poukázali na možnosti aplikácie zvoleného počítačového programu na modelovanie správania sa požiaru v uzavretom priestore. Dôležitým aspektom celého procesu modelovania je zadávanie vstupných parametrov. Tu je potrebné už vopred si pripraviť databázu údajov o fyzikálnych, chemických a požiarotechnických parametroch materiálov, s ktorých výskytom v danom priestore uvažujeme. Len zadaním čo najväčšieho počtu vstupných parametrov je možné dosiahnuť reatívne vysokú mieru správnosti výsledkov modelovania. Získanie týchto parametrov si vyžaduje vykonanie požiarnych skúšok a to najmä u materiálov, ktoré ešte nie sú dostatočne popísané. Pre overenie správnosti výsledkov modelovanie je však vo väčšine prípadov potrebné vykonať veľkorozmerové požiarne skúšky. To je však časovo i finančne náročné.

Je preto dôležité hľadať aj iné spôsoby validácie a verifikácie výsledkov vlastného modelovania s výsledkami už modelovaných požiarnych scenárov. Veľa z nich poskytuje americký Národný úrad pre normalizáciu a technológie (NIST) a to vo svojich užívateľských manuáloch a na web stránke.

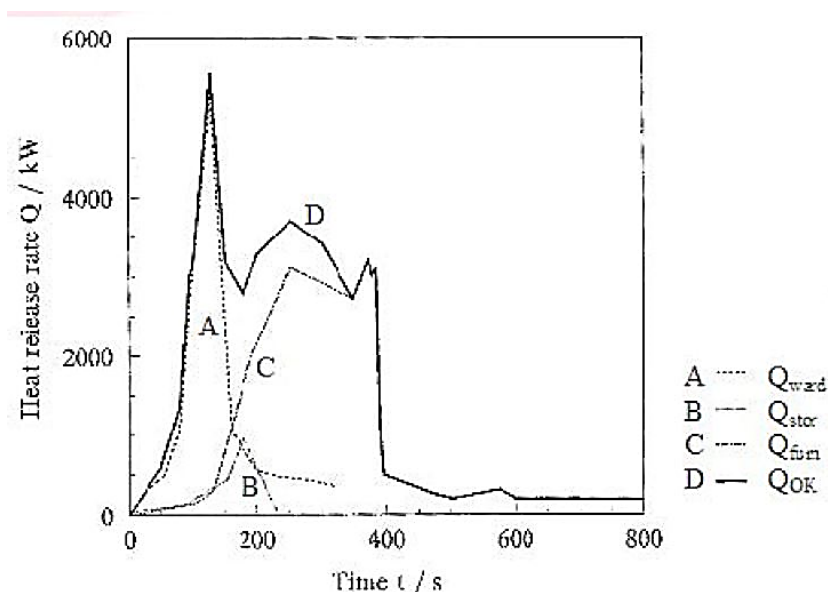
Pre validáciu a verifikáciu výsledkov modelovania tu prezentovaných požiarnych scenárov sme našli vhodné modely v prácach, ktoré publikovali Huczek (2007) a Fong (2014). Obaja sa venovali problematike štúdia správania sa požiaru v uzavretom priestore na báze realizácie veľkorozmerových testov. Vo svojich testoch však neuvažovali s odvetraním priestoru počas požiaru.

Práca Huczeka (2007) bola využitá na verifikáciu výsledkov vlastného štúdia požiaru v priestoroch spálne. Vo svojich scenároch uvažoval aj s automatickým spustením sprinklerových hlavíc stabilného hasiaceho zariadenia, ku ktorému došlo v stanovenom časovom intervale.

Fong (2014) sa vo svojej štúdií venoval výskumu parametrov požiaru, ktorý vznikne v kuchyni. Išlo však o „otvorenú kuchyňu“, t. j. súčasť spoločného priestoru s obývacou izbou a jedáľenským stolom.

Sledované a porovnávané boli v prípade požiaru kuchyne priebeh krivky rýchlosti uvoľňovania tepla na jednotku objemu (HRRPUV) a v prípade požiaru spálne okrem priebehu krivky HRRPUA aj teplota miestnosti v čase výskytu požiaru.

Na obrázku 57 je uvedený priebeh HRR, resp. HRRPUV, pre priestory kychyne, publikované Fongom (2014).



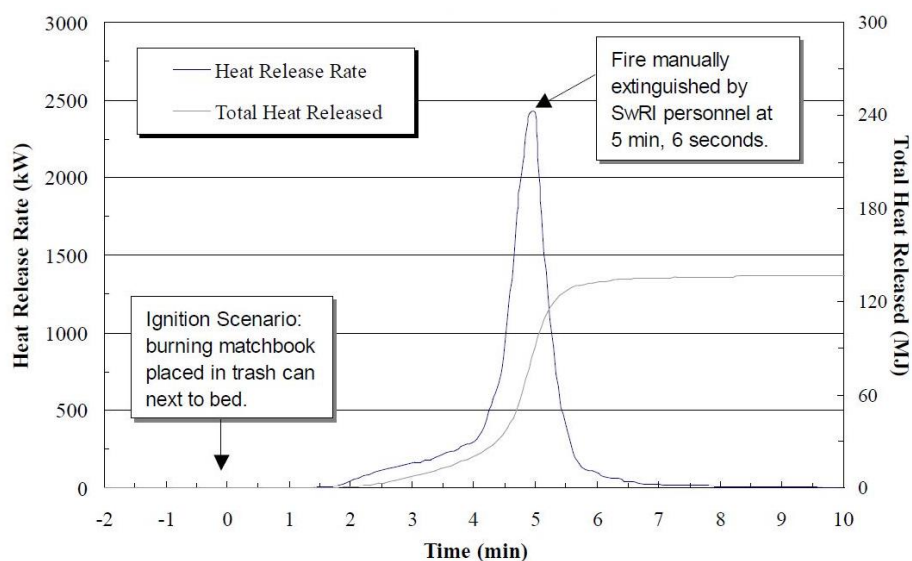
Obrázok 57 Priebeh krivky HRRPUV pri požiaru otvorenej kuchyne (Fong 2014)<sup>2</sup>

Zo získaných kriviek požiaru HRRPUV „otvorenej kuchyne“ vyplýva, že určitú zhodu s vlastnými výsledkami možno sledovať v prípade krivky A, ktorá reprezentuje horenie drevenej kuchynskej skrine situovanej v blízkosti iniciačného zdroja, ktorým aj v tomto prípade bolo vznietenie vriaceho oleja na panvici umiestnenej na elektrickom variči. Pri porovnaní krivky D (celkové rýchlosť uvoľňovania tepla v priestore) s vlastnými výsledkami sú rozdiely v jej priebehu veľmi výrazné. Tiež maximálna hodnota HRR bola dosiahnutá v približne rovnakom čase, hoci pri vyššej rýchlosti. Príčiny rozdielov vo výsledkoch je však potrebné hľadať v samotnej geometrii priestoru a podmienkach jeho odvetrania. Tu prezentované výsledky poukazujú okrem iného i na schopnosť materiálov (predmetov), ktoré sa vznietia skôr, ovplyniť proces horenia aj ostatných predmetov situovaných v miestnosti.

<sup>2</sup> Heat release rate – rýchlosť uvoľňovania tepla

V prípade požiaru spálne sa pre porovnanie použili výsledky veľkorozmerových testov zameraných na štúdium rozvoja dynamiky požiaru v priestoroch spálne. Požiar v tomto prípade vznikol vznietením smetného koša, ktorý bol situovaný v blízkosti postele a spôsobil následne vznietenie matraca postele. Spáľňa bola vybavená podobným interiérovým vybavením až na určité výnimky, napr. v izbe nebola umiestnená manželská posteľ ale jednolôžková posteľ, jeden nočný stolík, kôš na smeti a namiesto komody tam bol šatník.

Výsledky priebehu krivky HRRPUV sú prezentované na obrázku 58.

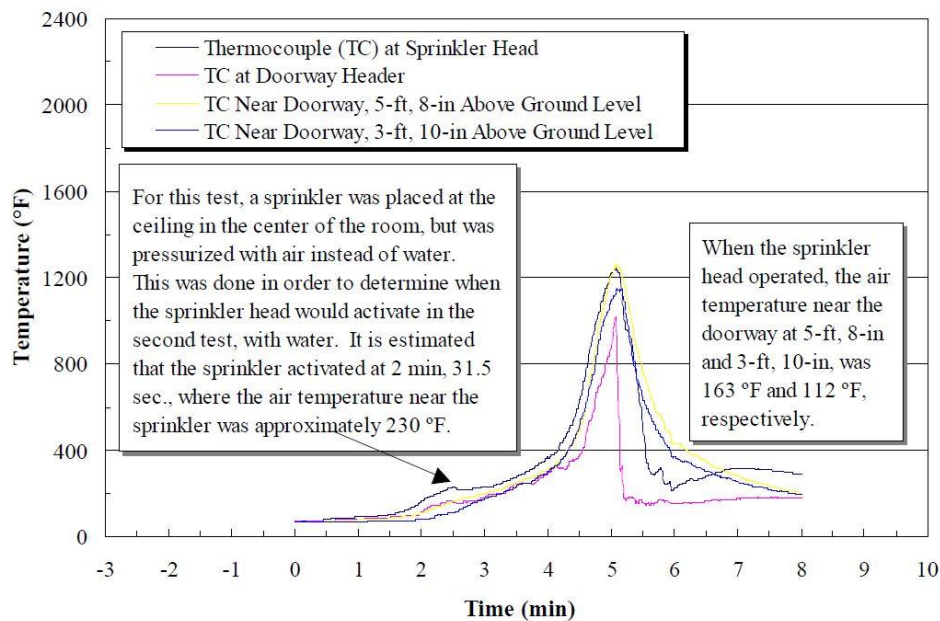


Obrázok 58 Priebeh krivky HRRPUV a celkového uvoľneného tepla pri požari spálne (Huczek 2007)<sup>3</sup>

Aj napriek určitým rozdielom v geometrii priestoru a interiérovom vybavení sa požiar v oboch posudzovaných prípadoch (výsledky veľkorozmerového testovania a vlastné výsledky z modelovania) vyvíjal dosť podobne až do približne 240 s, kedy v prípade veľkorozmerového modelu došlo k nástupu flashover, zatiaľ čo v rovnakom čase v prípade vlastných výsledkov modelovania už bolo zamerané dosiahnutie maximálnej hodnoty rýchlosti uvoľnenia tepla, t.j. vrcholný bod fázy plne rozvinutého požiaru v zmysle normovej teplotno-časovej krivky. Pričom rozdiel oboch hodnôt maximálnych hodnôt rýchlosti uvoľnenia tepla nebol veľmi výrazný (cca  $100 - 200 \text{ kW}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Z porovnania výsledkov priebehu vývoja hodnôt teploty vzduchu počas požiaru v spálni (žltá krivka (obrázok 59), je zrejme, že teploty v miestnosti v čase dosiahnutia vrcholu fázy plne rozvinutého požiaru boli veľmi podobné (modelovaný požiar:  $T = 704,21 \text{ }^\circ\text{C}$ ; veľkorozmerový test  $T \doteq 1250 \text{ }^\circ\text{F}$  ( $675 \text{ }^\circ\text{C}$ )).

<sup>3</sup> Heat Release Rate – rýchlosť uvoľňovania tepla; Total Heat Released – celkové uvoľnené teplo; Time - čas



Obrázok  
59

Priebeh krivky vývoja pri požiari spálne (Huczek 2007)

Aj z poznatkov vyplývajúcich z porovnania výsledkov modelovania a realizácie veľkorozmerových skúšok je zrejmé, že na dynamiku rozvoja požiaru má vplyv ako geometria miestnosti, tak aj dostupné palivo, či spôsob odvetrania miestnosti, v ktorej sa vyskytol požiar. Všetky tieto parametre ovplyvňujú nielen samotný proces horenia a následného šírenia požiaru aj do priestoru mimo pôvodnú miestnosť, ale aj tvorbu a šírenie splodín horenia, ktoré vznikajú pri požiari a sú mnohokrát toxické. Na ich zvýšenú toxicitu vplyvajú aj syntetické materiály, ktoré sa vyskytujú nielen ako súčasť interiérového vybavenia (sedačky, matrace, poľahy), ale aj ako súčasť zateplenia stavby (polystyrén).

Výsledky modelovania tu prezentovaných požiarnych scenárov sú použiteľné pre ďalšie štúdiá dynamiky rozvoja požiaru v uzavretom priestore ale aj pre ďalšiu kalibráciu požiarneho modelu. Tu je však potrebné opätovne upozorniť, že pre správnu kalibráciu, ale aj samotnú validáciu a verifikáciu výsledkov modelovania, je najvhodnejším riešením realizovať veľkorozmerové testovanie skúmaných požiarnych scenárov. Validácia a verifikácia výsledkov len na základe modelov, ktoré sú publikované na webových stránkach príslušných inštitúcií ako je aj NIST, či konfrontácia výsledkov s výsledkami iných autorov môže byť nedostatočná.

Dosiahnuté výsledky a získané poznatky publikované v monografii majú uplatnenie v ďalšom rozvoji a výskumnej činnosti v tejto oblasti na oboch partnerských inštitúciách, ktoré boli zapojené do spoločného riešenia projektu APVV-0057-12 „Progresívne metódy zisťovania požiarotechnických charakteristík materiálov v požiarnej inžinierstve“.

## 6 FORMULÁCIA ODPORÚČANÍ PRE ĎALŠÍ ROZVOJ POŽIARNEHO INŽINIERSTVA

Požiarne inžinierstvo, ako už bolo spomenuté v prvej kapitole tejto monografie predstavuje komplex vedeckých disciplín, výsledky výskumu ktorých sa aplikujú na štúdium dynamiky požiaru, vplyvu fyzikálnych a chemických vlastností materiálov na vznik a rozvoj požiaru. Veľmi dôležitým je aj skúmanie druhovej skladby a vlastností materiálov a to najmä z dôvodu tvorby toxických splođín horenia. Tie ohrozujú život a zdravie nielen osôb nachádzajúcich sa v priestore v čase vzniku požiaru, ale aj osôb, ktoré sa ďalej podieľajú na jeho likvidácii.

Zatiaľ čo vlastnosti väčšiny bežných materiálov a účinky požiaru na ne sú v súčasnosti už viacmenej preskúmané, málo preskúmanou oblasťou ešte stále zostávajú nové moderné materiály a tiež vplyv parametrov okolitého prostredia na zapálenie a následný rozvoj požiaru.

Technológie používané na výskum jednotlivých parametrov požiaru a dynamiky požiaru, disponujú v súčasnosti progresívnymi vedeckými a výpočtovými nástrojmi umožňujúcimi dosiahnutie významného pokroku v požiarom inžinierstve a to najmä v modelovaní požiaru v počítačovom prostredí a tiež vo vývoji noriem požiarnej bezpečnosti pre materiály, konštrukčné prvky budov i celé budovy.

Ako ukázali katastrofy, akými bol kolaps Svetového obchodného centra v roku 2001, alebo katastrofický požiar viacpodlažnej obytnej stavby v Londýne v polovici júna roku 2017, je nevyhnutné do požiarneho inžinierstva implementovať nové prístupy, progresívne a sofistikované metódy a technológie.

Jednou z oblastí, ktorá vyžaduje okamžitú aplikáciu nových prístupov je hodnotenie požiarnej odolnosti materiálov a stavebných konštrukcií. V tejto oblasti je nevyhnutné najmä:

- zlepšiť postupy požiarnych skúšok retardérov horenia aplikovaných nástrekmí ako aj ďalších systémov tepelnej ochrany stavebných konštrukcií,
- realizovať skúšky požiarnej odolnosti konštrukčných prvkov upevňovacích systémov nosných konštrukcií,
- realizovať skúšky požiarnej odolnosti konštrukčných systémov nosných konštrukcií v zmenšenej mierke, tak aby umožňovali tvorbu výstupov vo forme aplikovateľnej na konštrukčné prvky s reálnymi rozmermi,

- realizovať skúšky požiarnej odolnosti, prostredníctvom ktorých by bolo možné presne kvantifikovať tepelné a konštrukčné zaťaženie nosníkov s dlhým rozpätím a podlahových konštrukčných systémov.

Pre ich realizáciu je však potrebné v prvom rade identifikovať požiadavky na vývoj v oblasti testovania (skúšobníctve) konštrukčných prvkov, zostáv a systémov za realisticky simulovaných podmienok požiaru a zaťaženia. Cieľom je zlepšiť odolnosť týchto konštrukcií tak, aby nekontrolované požiare budov neviedli k vyhoreniu, pri ktorom by došlo k rozsiahlemu alebo úplnému kolapsu.

Okrem už spomínanej potreby zlepšovania jednotlivých požiarnych skúšok je potrebný aj ďalší rozvoj v oblasti informačných technológií a výpočtových kapacít výpočtovej techniky.

V posledných rokoch sa na stanovenie postupu požiarnych skúšok využíva najmä modelovanie správania požiaru. V tomto smere sa vedie už dlhšiu dobu v odborných kruhoch diskusia o druhoch a kvalite požiarnych skúšok a o tom, ako je možné tieto údaje aplikovať na počítačové modely požiaru a posúdenie rizika vzniku požiaru. Z doterajších diskusií vyplýva, že požiarne skúšky sa budú ďalej rozvíjať dvomi smermi.

Prvý smer sa bude zameriavať na rozvoj tradičných metód požiarneho skúšobníctva s ohľadom na bezpečnú aplikáciu materiálov a výrobkov.

Druhý smer sa viac zameria na vývoj štandardizovaných metód požiarneho skúšobníctva, striktné zameraných na poskytovanie vysoko presných údajov pre modely požiarneho rizika, ktoré budú aplikované v praxi. Dôležitou súčasťou tohto procesu bude určenie požadovanej presnosti merania pre každý z meraných parametrov, čo poskytne tvorcom požiarnych skúšok informácie potrebné pre návrh vhodných skúšobných metód, ktoré budú zodpovedať požiadavkám modelovania.

V konečnom dôsledku, ak sa tieto dve rozličné metódy požiarneho skúšobníctva budú ďalej rozvíjať, predpokladá sa, že nakoniec časom budú preferované viac metódy prediktívneho stanovenia požiarneho rizika, ktoré postupne nahradia technicky menej náročné metódy štandardizovaných požiarnych skúšok.

Okrem toho na rozvoj metód požiarneho skúšobníctva má vplyv aj aktuálny rozvoj v oblasti vývoja meracej techniky. Očakáva sa, že s vývojom nových meracích prístrojov dôjde postupne aj k ďalšiemu rozvoju metód požiarneho skúšobníctva založených na novej technike a technológiách. Vývoj v oblasti výpočtovej techniky a automatizácie spracovania

a vyhodnocovania nameraných údajov pravdepodobne tiež otvorí cestu pre vývoj ďalších progresívnych metód požiarneho skúšobníctva.

Na tomto mieste je potrebné spomenúť aj ďalšie požiadavky, ktoré sú kladené na rozvoj v oblasti požiarneho inžinierstva.

Vzhľadom na prebiehajúcu klimatickú zmenu a jej dopady, ale najmä na predpokladaný vývoj situácie do budúcnosti, je potrebné začať sa viac zaoberať aj v podmienkach Slovenskej republiky problematikou výskytu požiarov v tranzitnom rozhraní medzi prírodným a urbanizovaným prostredím, ktoré každoročne spôsobujú okrem iných škôd najmä zničenie množstva obytných i hospodárskych budov a veľakrát aj straty na ľudských životoch. Súčasnú stavebnú predpisovú súprávu upravujú tak, aby riešili len problematiku požiarov obytných budov a iných stavieb (kancelárske a nevýrobné stavby), nevenujú sa v dostatočnej miere problematike horenia budov z dôvodu prechodu požiaru z prírodného prostredia do obytného (prechod vonkajšieho požiaru na vnútorný požiar). Aj v tejto oblasti je potrebné zamerať sa na vývoj nových metód požiarneho skúšobníctva, aplikovateľných pri meraní požiarotechnických parametrov materiálov a systémov navrhnutých na zamedzenie vzniku a následného rozvoja požiaru stavieb a stavebných konštrukcií ako po ich vystavení požiaru v prírodnom prostredí (vonkajší požiar). Napríklad v Severnej Amerike, ktorej územie sa vyznačuje častým výskytom rozsiahlych požiarov v prírodnom prostredí, najmä v letnom období, sa výskum v tejto oblasti uberať cestou chápania procesov vzniku požiaru (zapálenia) v spojitosti s odletujúcimi horiacimi časticami z požiaru, ktoré sú veľmi typickým sprievodným javom tohto druhu požiaru, a hľadaním vhodných spôsobov ochrany budov pred týmito horiacimi časticami. Ako možné spôsoby riešenia tohto problému sa javia byť nastavenie výkonu ventilačných systémov v týchto budovách, penetračných systémov, strešných materiálov, vonkajších povrchových úprav a okenných systémov.

Potrebný je tiež vývoj a implementácia nových technológií pre meranie zapáliteľnosti materiálov. Zapáliteľnosť je dôležitou vlastnosťou materiálu, ktorá súvisí ako s následným rozvojom požiaru a taktiež s rýchlosťou uvoľňovania tepla pri požari. Vo všeobecnosti platí, že riadením zápalnosti materiálov je možné ovplyvniť ďalší rozvoj požiaru v spojitosti so zapálením sekundárnych materiálov. Tým sa zníži pravdepodobnosť vzniku flashover a ovplyvní sa produkcia nebezpečných množstiev oxidu uhoľnatého a iných toxických plynov vznikajúcich pri požari.

Napriek tomu, že kontrolovanie rýchlosti uvoľňovania tepla materiálov má významný vplyv na tvorbu toxických splodín horenia pri požiari, je naďalej potrebné pracovať na zlepšení riadenia tvorby toxických látok vznikajúcich pri pyrolýze a tvorbe splodín horenia. Taktiež je potrebné inovovať metódy stanovovania toxicity splodín horenia, ktoré umožnia presnejšie predpovedať vplyv toxických plynov vznikajúcich pri požiari na človeka. Kontrola pyrolýzy a toxicity horenia materiálov vedie k zníženiu rizika udusenía sa osôb nachádzajúcich sa v priestore požiaru.

Odklon od používania ropných produktov na výrobu energie, prepravu a vykurovanie v domácnostiach síce vedie k zvýšeniu ochrany životného prostredia, avšak na druhej strane vyvoláva potrebu vývoja nových metód požiarneho inžinierstva na riešenie špecifických požiarnych podmienok v súvislosti s využívaním alternatívnych palív (napr. etanol, stlačený zemný plyn, vodík) a ďalších novovyvíjaných palív.

Taktiež prechod na alternatívne a obnoviteľné zdroje energie vedie k výskytu nových rizík vzniku požiaru. Aj tu je potrebné vyvíjať nové metódy požiarneho inžinierstva na účely kvantifikácie výkonu domácich vykurovacích systémov, ktoré môžu zahŕňať také prvky, ako palivové články, či vyspelé fotovoltaické systémy a systémy na báze vodíka.

Metódy požiarneho inžinierstva budú čoraz častejšie aplikované aj pri hodnotení nových tried materiálov, ktoré súvisia s vývojom v oblasti materiálového inžinierstva, a vyznačujú sa jedinečnými požiarными vlastnosťami.

Potreba tvorby inovačných prístupov, aplikácie progresívnych metód požiarneho inžinierstva a tvorby štandardov je v súčasnosti aktuálna nielen v oblasti stavebníctva, ale aj v oblasti zisťovania príčin vzniku požiarov. V tomto smere je potrebná najmä orientácia na progresívne chemicko-analytické metódy a matematické modelovanie požiaru s cieľom pochopenia procesov a javov vznikajúcich pri požiari, tvorbu potenciálnych scenárov vzniku, propagácie a terminácie požiaru.

Výsledky matematického modelovania možno využiť na posúdenie a následne návrh opatrení na účely zabezpečenia požiarnej bezpečnosti stavieb ešte pred ich výstavbou, posúdenie protipožiarneho zabezpečenia existujúcich stavieb, rekonštrukciu požiarov budov pre stanovenie pravdepodobného scenára vzniku a rozvoja požiaru z hľadiska zisťovania príčin vzniku požiarov, ale aj ako nástroj pre výcvik hasičov-záchranárov, veliteľov zásahu a v neposlednom rade samotných zisťovateľov príčin vzniku požiarov.



## 7 ZÁVER

Predkladaná monografia poskytuje pohľad na vybrané problematiky požiarneho inžinierstva a to konkrétne na historický vývoj požiarneho inžinierstva, základné teoretické aspekty požiarneho skúšobníctva, ako aj samotnú dynamiku vnútorného požiaru, ktoré sú doplnené experimentálnym výskumom zameraným na zistenie možností aplikácie doteraz získaných výsledkov výskumu realizovaného oboma partnerskými inštitúciami, t.j. Technickou univerzitou vo Zvolene a Slovenskou technickou univerzitou v Bratislave, konkrétne Materiálovotechnologickou fakultou so sídlom v Trnave, v rámci riešenia projektu APVV-0057-12 „Progresívne metódy zisťovania požiarotechnických charakteristík materiálov v požiarom inžinierstve“ v matematickom modelovaní správania vnútorného požiaru a zisťovania jednotlivých parametrov požiaru a dymu vznikajúceho pri požiari, ktorý vznikol na kuchynskej linke v kuchyni a vznietením matraca postele v spálni jednopodlažnej nadzemnej stavby, zohľadňujúc meniace sa parametre odvetrania priestoru a meniaci sa iniciačný zdroj požiaru, resp. príčinu a miesto vzniku požiaru.

Štúdiá dynamiky požiaru a jeho vybraných parametrov predstavená v tejto monografii nepatrí k ojedinelým aplikáciám počítačových programov pre modelovanie vybraných požiarnych scenárov ani na jednej z partnerských inštitúcií. Aj v rámci validácie a verifikácie tu predstavených výsledkov modelovania boli použité údaje výskumu realizovaného Technickou univerzitou vo Zvolene, napr. Kucharčíková (2006) a Mózerová (2009).

Výsledky modelovania poukazujú na možnosti využitia tu aplikovaného požiarneho modelu, resp. použitých programových prostredí pre účely štúdiá parametrov dynamiky požiaru.

Avšak samotné modelovanie by nebolo možné aplikovať bez existencie súboru vstupných údajov reprezentujúcich základné fyzikálne, chemické a požiarotechnické údaje, vrátane údajov termickej analýzy použitých materiálov a kompozitov. Tieto a ďalšie údaje potrebné pre pochopenie vzniku a dynamiky požiaru boli získané na základe experimentov realizovaných na oboch partnerských inštitúciách. Niektoré z nich už boli odpublikované (napr. Rantuch et al. (2014), Rantuch, Kačíková, Nagypál (2014), Martinka et al. (2013, 2014, 2015), Mitterová (2012), Mitterová et al. (2014), Danihelová, Mitterová (2015), Zachar et al. (2014, 2017), Tereňová et al. (2016, 2017), Orémusová (2013, 2016), Bubeníková, Veľková (2015), Kamenská, Kačíková, Veľková (2015)) a niektoré ešte len čakajú na publikovanie. Vo veľkej miere tieto reprezentujú výsledky realizácie laboratórnych (malorozmerových) požiarnych

skúšok. Pre získanie objektívnejších údajov o jednotlivých materiáloch použitých v konštrukciách stavieb ale najmä vo vybavení interiéru, bude do budúcnosti potrebné realizovať aj stredno a najmä veľkorozmerové požiarne skúšky, ktoré na druhej strane umožnia aj samotnú validáciu, verifikáciu a následnú kalibráciu používaných požiarneho modelov, resp. úpravu požiarneho scenárov. Nemenej dôležitou je požiadavka na budovanie databázy výsledkov výskumu zaoberajúcich sa analýzou fyzikálnych, chemických a požiarotechnických vlastností materiálov, a to nie len tých bežne používaných, ale aj novovyvíjaných. V tomto smere je potrebné podrobné štúdium výsledkov doterajšieho výskumu na Slovensku, ale najmä v zahraničí. Postupne však bude potrebné realizovať malo až veľkorozmerové požiarne skúšky a doplniť tak súbor chýbajúcich údajov o jednotlivých materiáloch a kompozitoch. Tieto bude potrebné zároveň validovať a verifikovať s výsledkami doterajšieho výskumu.

Vybudovanie takejto komplexnej databázy údajov by nakoniec umožnilo aj implementáciu postupov a nástrojov, resp. metód požiarneho inžinierstva, najmä počítačom podporovaného modelovania správania sa požiarov v stavebníctve a najmä v bezpečnostnej praxi.

Uplatnenie týchto metód, resp. nástrojov je zrejmé v stavebníctve, a to najmä pri testovaní požiarnej odolnosti navrhovaných stavebných konštrukcií, plánovanie ďalších opatrení na zaistenie požiarnej bezpečnosti stavieb, vrátane návrhu situovania a parametrov zariadení na odvod tepla a splodín horenia, posúdenia efektívnosti a možností inštalácie stabilných hasiacich zariadení a pod.

Ďalšou oblasťou aplikácie výsledkov najmä požiarneho skúšobníctva, ale aj modelovania správania požiaru je oblasť zisťovania príčin vzniku požiaru. Hoci v prípade modelovania ide v zahraničí o oblasť, kde sa modelovanie správania požiaru s využitím počítačov využíva veľmi často, na Slovensku ide v podstate ešte stále o novú, nie celkom preskúmanú oblasť. Doteraz bolo realizovaných len niekoľko štúdií. Taktiež neexistuje špecificky zamerané vzdelávanie v tejto oblasti. To je aj dôvod prečo doteraz nebolo počítačom podporované modelovanie požiaru implementované v bezpečnostnej praxi Slovenskej republiky.

V zisťovaní príčin vzniku požiarov majú svoje uplatnenie pri overení pravdepodobnosti vzniku požiaru podľa scenárov vzniku a rozvoja požiaru, ktoré stanovili zisťovatelia príčin vzniku požiaru na obhliadke požiariska a pri vyťažovaní svedkov požiaru a príslušníkov Hasičského a záchranného zboru zúčastňujúcich sa na hasení a likvidácii požiaru. To vedie nakoniec k stanoveniu samotnej príčiny vzniku požiaru – určeniu najpravdepodobnejšieho scenára

vzniku požiaru. V prípade, že pri požiaroch došlo aj k usmrteniu osôb, okrem samotného procesu šírenia požiaru sú pre zisťovateľov vzniku požiaru dôležité aj informácie o toxicite spodín horenia vzniknutých pri požiaroch a koncentrácii kyslíka v priestore zasiahnutom požiarom. Na základe výsledkov modelovania je možné určiť aj čas, kedy zvýšená koncentrácia spodín horenia mohla spôsobiť udusenie tejto osoby.

Poslednou oblasťou aplikácie výsledkov progresívnych metód požiarneho inžinierstva, najmä požiarneho skúšobníctva a matematického modelovania správania sa požiarov, je požiarne taktika. Na základe poznatkov o správani sa požiaru, toxicite spodín horenia známych druhov materiálov a zapojením počítačového matematického modelovania správania sa požiaru je možné plánovať taktiku hasenia požiaru. Samozrejme vzhľadom na absenciu plánov stavby v digitálnej forme, absenciu odborne pripraveného personálu nie je možné aplikovať modelovanie v reálnom čase. Avšak je možné naučiť sa predikovať dynamiku rozvoja požiaru a efektívne postupy hasenia požiarov v typových stavbách. Takéto vzdelávanie by bolo možné implementáciou nástrojov počítačového modelovania správania sa požiaru do špecializovanej odbornej prípravy hasičov-záchranárov, ale najmä špecializovanej odbornej prípravy zameranej na oblasť operatívneho riadenia príslušníkov Hasičského a záchranného zboru.

Na záver by sme chceli vyjadriť želanie, že táto publikácia si nájde svojich čitateľov, ktorí v nej nájdu informácie, ktoré sú pre nich zaujímavé, možno nové, a nakoniec nájdu inšpiráciu pre tvorbu svojich vlastných experimentov, návrh nových inovatívnych postupov požiarneho skúšobníctva, inovácie doterajších skúšobných zariadení či aplikácie výsledkov počítačom podporovaného matematického modelovania svojich vlastných požiarnych scenárov.

## 8 SUMMARY

While the properties of most common materials and their fire properties are more or less investigated now, the poorly investigated area represent the new modern materials and the impact of the surrounding environment on the ignition and subsequent propagation of the fire.

The technologies used to test individual fire and fire behavior parameters currently have progressive scientific and computational tools to make significant advances in fire engineering, notably in modelling the fire behaviour in a computer environment, and also in the development of fire safety standards for constructions, construction elements and the entire constructions.

As disasters such as the the collaps of the World Trade Center in 2001 or the catastrophic fire of a multi-storey residential building in London in mid-June of this year (2017) have shown, new approaches, progressive and sophisticated methods and technologies must be implemented in fire engineering.

The presented monograph provides insight into selected issues of fire engineering, namely the history of fire engineering, basic theoretical aspects of fire testing as well as the dynamics of the compartment fire complemented by experimental research aimed at finding out the possibilities of application of the results of the research conducted by both partner institutions in the framework of the project APVV-0057-12 "Progressive methods of material fire-technical characteristics determination in fire engineering" in mathematical modelling the compartment fire behaviour and study of the parameters of smoke as product of a fire that occurred at the upper side of the kitchen unit in kitchen and a fire caused by the ignition of a mattress in the bedroom of the model construction. There were also the changing ventilation parametres as well as changing ignition source, the fire cause and site respectively, taken into account.

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| APVV                           | Agentúra pre podporu vedy a výskumu                             |
| ASTM                           | American Society for Testing and Materials                      |
| C                              | Uhlík   |
| CAD                            | Computer-Aided Design   |
| CFD                            | Computer Fluid Dynamics   |
| CO                             | Oxid uhoľnatý   |
| CO <sub>2</sub>                | Oxid uhličitý   |
| DTA                            | Diferenčná termická analýza                                     |
| DTG                            | Derivačná termogravimetria                                      |
| DSC                            | Diferenciálna snímacia kalorimetria                             |
| EN                             | Európska norma  |
| FDS                            | Fire Dynamic Simulator  |
| FO                             | Flashover   |
| FTIR                           | Infračervená spektroskopia s Fourierovou transformáciou         |
| GC                             | Plynová chromatografia  |
| H <sub>2</sub>                 | Vodík   |
| H <sub>2</sub> O               | Voda  |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Kyselina sírová   |
| HNO <sub>3</sub>               | Kyselina dusičná  |
| HPLC                           | High Precision Liquid Chromatography                            |
| HRR                            | Rýchlosť uvoľňovania tepla                                      |
| HRRPUA                         | Rýchlosť uvoľňovania tepla na jednotku plochy (m <sup>2</sup> ) |
| IR                             | Infračervený  |
| ISO                            | International Organisation for Standardisation                  |
| LC                             | Kvapalinová chromatografia                                      |
| LIFT                           | Lateral Ignition and Flame Spread Test                          |
| MS                             | Microsoft   |
| MS                             | Hmotnostná spektroskopia  |
| N <sub>2</sub>                 | Dusík   |
| NBS                            | National Bureau of Standards / Národný úrad pre normalizáciu    |
| NFPA                           | National Fire Protection Association                            |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| NIST                          | National Institute of Standards and Technology / Národný úrad pre normalizáciu a technológie                            |
| O <sub>2</sub>                | Kyslík  |
| PMMA                          | Polymetylmetakrylát (plexisklo)   |
| PTEÚ MV SR                    | Požiarotechnický a expertízny ústav Ministerstva vnútra Slovenskej republiky  |
| PVC                           | Polyvinylchlorid  |
| RANS                          | Reynoldsaveraged Navier–Stokes  |
| STN                           | Slovenská technická norma   |
| TG                            | Termogravimetria  |
| TÚPO                          | Technický ústav požární ochrany   |
| USA                           | Spojené štáty americké  |
| UV                            | Ultrafialový  |
| VIS                           | Viditeľné spektrum  |
| <i>b</i>                      | Polomer vzostupného prúdu spalín v určitej výške nad palivom  |
| <i>c</i>                      | Tepelná konduktivita  |
| <i>g</i>                      | Gravitačné zrýchlenie   |
| <i>h<sub>l</sub></i>          | Vzdialenosť neutrálnej roviny od stredu dolného otvoru  |
| <i>h<sub>u</sub></i>          | Vzdialenosť od neutrálnej roviny k stredu horného otvoru  |
| <i>k</i>                      | konduktivita  |
| <i><math>\dot{m}</math></i>   | Hmotnostná rýchlosť odhorievania  |
| <i><math>\dot{m}''</math></i> | Plošná rýchlosť odhorievania  |
| <i>m<sub>f</sub></i>          | Hmotnosť dostupného paliva  |
| <i>m<sub>ox</sub></i>         | Hmotnosť dostupného kyslíka   |
| <i><math>\dot{m}_p</math></i> | Hmotnostný tok spalín   |
| $\Delta p$                    | Zmena hydrostatického tlaku vzduchu   |
| <i>p<sub>0</sub></i>          | Atmosférický tlak   |
| <i>r</i>                      | Vzdialenosť rozšírenia prúdu spalín pozdĺž stropu; podiel hmotnosti paliva reagujúceho s jednotkovou hmotnosťou kyslíka |
| <i>t</i>                      | Čas   |
| <i>u<sub>0</sub></i>          | Rýchlosť vzostupného prúdu spalín   |
| <i>v</i>                      | Rýchlosť  |
| <i>y<sub>i</sub></i>          | Výťažok zložky spalín   |
| <i>z</i>                      | Výška   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $A$             | Plocha otvoru  |
| $A_f$           | Horizontálna horiaca plocha paliva                           |
| $A_o$           | Plocha otvorov   |
| $A_T$           | Plocha povrchov bez otvorov                                  |
| $C_d$           | Koeficient prietoku  |
| $D$             | Priemer horenia  |
| $D_m$           | Hmotnostná optická hustota dymu                              |
| $E_i$           | Energia iniciácie  |
| $H$             | Vzdialenosť stredov otvorov                                  |
| $\Delta H_c$    | Úplné spaľovacie teplo                                       |
| $\Delta H_{ef}$ | Efektívne spaľovacie teplo                                   |
| $\Delta H_g$    | Teplo splyňovania  |
| $H_o$           | Výška otvorov  |
| $H_D$           | Výška zadymenia  |
| $H_N$           | Výška neutrálnej roviny                                      |
| $L_f$           | Stredná výška plameňa  |
| $Q$             | Požiarne zaťaženie   |
| $Q''$           | Hustota požiarneho zaťaženia                                 |
| $\dot{Q}$       | Rýchlosť uvoľňovania energie (tepla); celkové uvoľnené teplo |
| $\dot{Q}_c$     | Teplo prenášané konvekciou                                   |
| $T$             | Teplota  |
| $T_\infty$      | Teplota prostredia   |
| $T_g$           | Teplota horúcich plynov                                      |
| $T_w$           | Teplota stropu   |
| $W$             | Šírka otvoru   |
| $\alpha$        | Faktor rastu; koeficient nasávania; optická hustota aerosólu |
| $\chi$          | Účinnosť spaľovania  |
| $\delta$        | Hrúbka   |
| $\rho$          | Hustota  |

## 10 VECNÝ REGISTER

Backdraft ...28

Difraktografia ...75, 78, 89

Dynamika požiaru ...4, 6, 9, 10, 11, 16, 18, 20, 23, 27, 39, 100, 112, 130, 132, 133, 137,

Flashover ...26 - 29, 31, 34, 47 - 50, 54, 55, 71, 73, 74, 117, 119, 121, 122, 125, 129

Horenie ...7, 13, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 33, 35, 37, 38, 54, 55, 56, 64, 71, 100, 104, 125, 130

Horľavá kvapalina ...35, 37, 56, 61, 68

Horľavý materiál ...28, 33, 48, 98

Chromatografia ...75, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86

Kónický kalorimeter ...19, 59

Modelovanie ...4, 16, 20, 21, 56, 88-114, 119, 121, 123, 125 - 128, 130-133

Požiarne bezpečnosť ... 3, 12, 19, 21, 63, 72, 91, 103, 104, 133, 136, 138

Požiarne inžinierstvo ...4, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 18, 20, 23, 58, 63, 99, 104, 133

Požiarne skúšky ...13, 14, 18, 20, 57, 63, 129, 134, 138

Požiarne skúšobníctvo ...3, 4, 7-13, 18, 19, 63, 134, 135, 137, 138, 139

Požiarotechnické charakteristiky ...3, 4, 19, 57, 58, 64, 68, 105, 107, 129, 132, 135, 137, 138

Požiarne model ...18, 20, 21, 94, 105, 132, 138

Produkty horenia ...16, 26, 53, 54, 98, 101

Progresívne metódy ...4, 6, 8, 18, 57, 58, 63, 78, 91, 105, 132, 133, 135-137, 139, 140

Protipožiarne ochrana ...6, 7, 15, 20, 70

Prúd spalín ...30, 40, 41

Rollover ...28

Rozvoj požiaru ...4, 31, 32, 33, 35, 37, 72, 75, 88, 89, 127, 129

Rýchlosť odhorievania ...34, 35, 37, 88, 98, 106, 111, 114, 116, 117, 119, 120

Rýchlosť uvoľňovania tepla ...17-19, 34, 50, 55, 72-74, 98, 110-112, 114, 117, 119, 124, 129

Spaliny ...25, 48, 51, 65



Spektrometria ...77, 78, 79, 83

Spalodiny horenia ...6, 16, 73, 116

Tepelný tok ...3, 11, 14, 33, 34, 48, 55, 56, 58, 59, 72, 89, 91, 98, 117

Teplo ...6, 9, 13, 17, 22, 23, 26, 31, 35, 40, 59, 65, 96, 109, 117

Termická analýza ...61,75, 79, 80, 81, 131

Termočlánok ...11, 17, 65, 105, 106, 112, 113, 117, 121

Termodynamika ...6, 9, 11

Toxicita požiaru ...16, 17

Trojuholník horenia ...22, 23, 27

Vnútorý požiar ...4, 26-29, 31, 36, 88, 89, 102, 104, 119, 129, 131

## 11 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. ADAMS, A.H. 1976. *Flooring Radiant Panel Test, Proceedings. Fire Retardency in the Interior Furnishing Industry*. Fire Retardant Chemical Association, Lancaster.
2. ALARIE, Y., BARROW, C. 1977. *Toxicity of Plastic Combustion Products. Toxicological Methodologies to Assess the Relative Hazards of Thermal Decomposition Products from Polymeric Materials*. NBS-GCR-77-85, National Bureau of Standards.
3. ASTM International. 1950. *ASTM E84 Test Method for surface burning of Building Material*.
4. ASTM International. 1958. *ASTM E136 Fire tests on building materials and structures for non-combustibility test for materials*.
5. ASTM International. 1962. *ASTM E162 Standard Test Method for Surface Flammability of Materials Using a Radiant Heat Energy Source*.
6. ASTM International. 1959. *ASTM E906 Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using a Thermopile Method*.
7. ASTM International. 1978. *ASTM E648 Standard Test Method for Critical Radiant Flux of Floor-Covering Systems Using a Radiant Heat Energy Source*.
8. ASTM International. 1983. *ASTM E970 Standard Test Method for Critical Radiant Flux of Exposed Attic Floor Insulation Using a Radiant Heat Energy Source*.
9. ASTM International. 1995. *ASTM E1678-02 Standard Test Method for Measuring Smoke Toxicity for Use in Fire Hazard Analysis*.
10. ASTM International. 2004. *ASTM E1995 Standard Test Method for Measurement of Smoke Obscuration Using a Conical Radiant Source in a Single Closed Chamber, With the Test Specimen Oriented Horizontally*.
11. ASTM International. 2006. *ASTM E662 Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials*.
12. ASTM International. 2013. *ASTM E1321 Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties*.
13. ASTM International. 2015. *ASTM E681-9 Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases)*.
14. BABRAUSKAS, V. 1982. *Development of the Cone Calorimeter – A Bench Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption*. NBSIR 82-2611, National Bureau of Standards, Gaithersburg.
15. BABRAUSKAS, V. 2009. *Ignition Handbook*. Issaquah: Fire Science Publishers, 1116 p.
16. BABRAUSKAS, V. et al. 1982. *Upholstered Furniture Heat Release Rates Measured with a Furniture Calorimeter*. MBSIR 82-2604, National Bureau of Standard, Gaithersburg.
17. BALOG, K., KVARČÁK, M. 1999. *Dynamika požáru*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. 96 s. ISBN 80-86111-44-X.

18. BEASON, D.G., ALVARES, N.J. 1977. *Variations in the Burning Characteristics of Low Porosity Cribs*. Combustion Institute/Western States Section.
19. BENJAMIN, I.A., DAVIS, S. 1979. Flammability Testing for Carpet. *Fire Technology*, Vol. 15, No. 3, 1979.
20. BERNATÍK, A. 2006. *Prevenca závažných havárií I*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 86 s.
21. BEYLER, C., CARPENTER, D., DINENNO, P. 2008. *Introduction to Fire Modeling. Fire Protection Handbook*. 20th Edition. Quincy, Maryland: National Fire Protection Association.
22. BUBENÍKOVÁ, T., VELKOVÁ, V. 2015. Analýza prchavých produktov vznikajúcich pri termickom zaťažení PUR peny so zníženou horľavosťou pri teplotách do 150 °C. In *Teplo - oheň - materiály 2015: zborník príspevkov z 3. medzinárodného sympózia: Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 22.-23. október 2015* / eds. Danica Kačíková, Barbara Falatová. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2015. ISBN 978-80-228-2825-3. S. 10-17.
23. CONSIDINE, D.M. 1974. *Process Instruments and Controls Handbook*. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Company.
24. ČSN EN 14034-3+A1: 2011. *Stanovenie výbuchových charakteristík rozvíreného prachu. Časť 3: Stanovenie dolnej medze výbušnosti LEL rozvíreného prachu*.
25. DANIHELOVÁ, A., MITTEROVÁ, I. 2015. Selected parameters of fire resistant glass. In *Nové trendy akustického spektra = New trends of acoustic spectrum : vedecký recenzovaný zborník : peer-reviewed proceedings* / ed. Martin Čulík, Anna Daniheľová ; rec. Martin Čulík ... [et al.]. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2015. ISBN 978-80-228-2759-1. S. 145-151.
26. DE RIS, J.N. 1973. Modeling Techniques for Prediction of Fires. *Applied Polymer Symposium No. 22*. New York: John Wiley & Sons, 1973, pp. 185 – 193.
27. DEIJBJERG, T. et al. 2003. *Argos User`s Guide – A step by step guide to fire simulation*. Copenhagen: Danish Institute of Fire and Security Technology, 2003, pp. 165.
28. DENYES, W., QUINTIERE, J. 1973. *Experimental and Analytical Studies of Floor Covering Flammability with a Model Corridor*. NBSIR 73-199, National Bureau of Standards, Gaithersburg.
29. DRYSDALE, D. 1999. *An Introduction to Fire Dynamics*. 2. vyd. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1999. 451 s. ISBN 0-471-97291-6.
30. EINHORN, I.N. 1973. Smoke and survival during fire exposure. *Polym. Prepr.*, Vol. 14, 1973. pp. 1001-1009.
31. EMMONS, H.W. 1959. A U. S. Program of Fire Research. *Quarterly of the National Fire Protection Association*, Vol. 52, No. 3, 1959.
32. EN ISO 1716: 2010-12. *Skúšky reakcie výrobkov na oheň. Stanovenie celkového spalného tepla*.
33. FARADAY, M. 1861. *Faraday`s Chemical History of a Candle*. Chicago: Review Press.
34. FERGUSON, G. 1933. Fire Gases. *Quarterly of the National Fire Protection Association*, Vol. 27, No. 2, 1933.

35. FORNEY, G.P. 2013. *Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, Volume I – User’s Guide*. NIST Special Publication 1017-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
36. FONG, N.K. 2014. Heat Release Rate of an Open Kitchen Fire of Small Residential Units in Tall Buildings.
37. GAY-LUSSAC, J.L. 1821. *Ann. Chim. Phys.*, Vol. 18, no. 2, p. 211.
38. GLASA, J. et al. 2012. Use of PyroSim for simulation of cinema fire. *Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology*. Vol. 7, no. 2, pp. 51-56. ACEEE, New York, USA, 2012.
39. GLASSMAN, I. 1977. *Combustion*. New York: Academic Press Inc.
40. GORBETT, E.G. 2008. *Computer fire models for fire investigation and reconstruction*. Eastern Kentucky University, 12 p. [Cit. 22.07.2017]. Dostupné na internete: <[http://fireand arsoninvestigation.eku.edu/sites/fireand arsoninvestigation.eku.edu/files/isfi\\_modeling\\_paper.pdf](http://fireand arsoninvestigation.eku.edu/sites/fireand arsoninvestigation.eku.edu/files/isfi_modeling_paper.pdf)>
41. GROSSHANDLER, W. 1993. *RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment*. NIST Technical Note 1402, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
42. HALADA, L., GLASA, J. 2013. Počítačová simulácia lesných požiarov. *Civilná ochrana, revue pre civilnú ochranu obyvateľstva*. Roč. 15, č. 4, s. 39-41.
43. HARMAN, P.M. 2002. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*. Volume III. Cambridge University.
44. HESKESTAD, G. 1991. A Reduced-Scale Mass Fire Experiment. *Combustion and Flame*, Vol. 83, 1991, pp. 293–301.
45. HILL, K. et al. 2007. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, NUREG 1824*. United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
46. HU, L.H., FONG, N.K. 2007. Modelling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 140, pp. 293-298.
47. HUGGETT, C. 1978. Oxygen Consumption Calorimetry. *Fall Technical Meeting on Chemical and Physical Processes in Combustion*, Combustion Institute/Eastern States Section, Pittsburgh.
48. HUCSEK, J.P. 2007. Demonstration Testing: Extinguishment of Kitchen Fires and the Effect of Sprinklers in a Residential Setting. In *Suppression and Detection Research and Applications: A Technical Working Conference (SUPDET 2007)*, Orlando, Florida, March 5-8, 2007, 7p.
49. HWANG, CH. – H. et al. 2010. Studies on Fire Characteristics in Over- and Underventilated Full-Scale Compartments. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 28, 2010, pp. 459-486.
50. ISO 9705: 1993. *Fire tests. Full-scale room test for surface products*.
51. ISO 5660-1: 2002. *Reaction-to-fire tests. Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*.
52. ISO 5660-2: 2002. *Reaction-to-fire tests. Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement)*.

53. ISO 5658-1: 2006. *Reaction to fire tests. Spread of flame. Part 1: Guidance on flame spread.*
54. ISO 5658-2: 2006. *Reaction to fire tests. Spread of flame. Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration.*
55. ISO 9705-1: 2016. *Reaction to fire tests. Room corner test for wall and ceiling lining products. Part 1: Test method for a small room configuration.*
56. KAČÍK, F., GEFFERT, A., KAČÍKOVÁ, D. 2007. *Chémia*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 386 s.
57. KAMENSKÁ, V., KAČÍKOVÁ, D., VEĽKOVÁ, V. 2015. Charakteristika a analýza rozkladných produktov polystyrénov. *Delta: vedecko-odborný časopis Katedry protipožiarnej ochrany*. ISSN 1337-0863. Roč. 8, č. 16 (2014), s. 19-23.
58. KARLSSON, B., QUINTIERE, J.G. 2000. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 0-8493-1300-7. 336 s.
59. KING, L.V. 1914. On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires, with Applications to Hot-Wire Anemometry. *Philosophical transaction of the Royal Society of London. Series A: Containing paper of a mathematical or physical character.*
60. KOKKALA et al. 1993. Rate of heat release and ignitability indices for surface linings. *Fire and Materials*. Vol. 17, no. 5, p. 209-216. ISSN 1099-1018.
61. KORHONEN, T., HOSTIKKA, S. 2009. *Fire Dynamics Simulator with evacuation: FDS+Evac*. Technical Reference and User's Guide, VTT Technical Research centre of Finland.
62. KUČERA, P., PEZDOVÁ, Z. 2010. *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 111 s.
63. KUCHARČÍKOVÁ, J. 2006. *Aplikácia softvérového modelu na dynamiku rozvoja vnútorného požiaru*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2006, s. 75.
64. LAWSON, J.R. 2009. *A History of Fire Testing*. NIST Technical Note 1628, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
65. LAWSON, J.R., WALTON, W.D., TWILLEY, W.H. 1984. *Fire Performance of Furnishings as Measured in the NBS Furniture Calorimeter, Part 1*. NBSIR 83-2787, National Bureau of Standards, Gaithersburg.
66. MARTINKA, J. 2015. *Reakcia materiálov na oheň a zisťovanie príčin vzniku požiarov*. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, AlumniPress, 104 s.
67. MARTINKA, J. et al. 2015. Influence of spruce wood form on ignition activation energy. *WOOD RESEARCH*. Vol. 60, no. 5 (2015), p. 815-822.
68. MARTINKA, J. et al. 2013. Posúdenie požiarneho rizika termicky modifikovaného smrekového dreva. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*. Vol. 55, no. 2 (2013), p. 117-128.
69. MARTINKA, J. et al. 2014. Study of selected natural materials ingitability. *Advanced materias Research*. ISSN 1022-6680. Zväzok 1001 (2014), s. 201-261.
70. MARTINKA, J., BALOG. K. 2014. *Požiarne inžinierstvo*. Trnava: AlumniPress, 201 s.

71. MCCAFFREY, B., HESKESTAD, G. 1976. *Combustion and Flame*. Vol. 26, 1976, pp. 125-127.
72. McGRATTAN, K., HAMINS, A. 2006. Numerical simulation of the Howard street tunnel fire. *Fire Tech.*, vol. 42, pp. 273-281.
73. McGRATTAN, K. et al. 2013a. *Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide*. NIST Special Publication 1019. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland
74. McGRATTAN, K. et al. 2013b. *Fire Dynamics Simulator*. Technical Reference Guide, Volume 1 - Mathematical Model, (6th edition). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
75. Mc CAFFREY. 1979. *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. NBSIR79-1910. Washington: National Bureau of Standards, Department of Commerce.
76. MILLER, F., DILLON, T.J., SMITH, M.K. 1980. *Concepts in Physics*. 3rd Edition, New York: Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
77. MITTEROVÁ, I. 2012. Evaluation of selected wood species from the fire safety point of view. In *Wood and fire safety: 7th international scientific conference : proceedings / ed. Anton Osvald*. Ostrava - Zábřeh: Šmíra - Print, 2012. ISBN 978-80-87427-23-1. P. 163-170.
78. MITTEROVÁ, I. et al. 2014. Reaction to fire of an insulating material on the basis of the cork. In *Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology*. ISSN 1898-5912. No. 87 (2014), p. 148-152.
79. MÓZEROVÁ, J. 2009. *Návrh popisu vnútorného požiaru podľa vybraného požiarneho scenáru s využitím počítačového modelovania*. Zvolene. Technická univerzita vo Zvolene, 2009, s. 124.
80. NEWTON, W., PARTINGTON, CH.F. 1825. *Charles Anthony Deane – 1823 patent*. Newton's London Journal of Arts and Sciences 9.
81. NORDMANN, J. 1974. *What is Chemistry, A Chemical View of Nature*. New York: Harper & Row Publishers.
82. NRC. 2006. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research. Washington, DC.
83. OSVALD, A. et al. 2009. *Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany*. Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene. 355 s.
84. ORÉMUSOVÁ, E. 2013. Porovnanie zápalnosti mäkkých PUR pien používaných v čalúnených výrobkoch. In *Delta: vedecko-odborný časopis Katedry protipožiarnej ochrany*. ISSN 1337-0863. Roč. 7, č. 14 (2013), s. 11-15.
85. ORÉMUSOVÁ, E. 2016. *Termická analýza vybraných čalúnnických materiálov*. Rec. Anton Osvald, Ivana Tureková. 1. vyd. Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene, 2016. 79 s. ISBN 978-80-228-2857-4.
86. PARKER, W.J. 1977. *An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E 84 Tunnel Test*. NBS Technical Note 945, National Bureau of Standards.
87. PEACOCK, R.D., RENEKE, P.A., FORNEY, G.P. 2017. *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7), Volume 2: User's Guide*. NIST

- Technical Note 1889v2. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
88. PURSER, D.A. 2002. *Toxicity Assessment of Combustion Products*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd edition), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
  89. RANTUCH, P. et al. 2014. Vplyv rýchlosti ohrevu na termický rozklad izolácie z drevovláknitej hmoty = The influence of the heat rate to thermal decomposition of wood fibre insulation. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*, Vol. 56, no. 1 (2008), pp. 97–108.
  90. RANTUCH, P., KAČÍKOVÁ, D., NAGYPÁL, B. 2014. Investigation of activation energy of polypropylene composite thermooxidation by model-free methods. *European Journal of Environmental and Safety Sciences*, Vol. 2, no. 1 (2014), p. 12 – 18.
  91. REHM, R.G., BAUM, H.R. 1978. The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows. *Journal of Research of the NBS*. Vol. 83, pp. 297–308, 1978.
  92. REINKE, R.A., REINHARDT, D.F. 1973. Fires, toxicity and plastics. *Modern Plastics*, Vol. 4, 1973, pp. 94-99.
  93. RICHARDS, B. 1918. Standardization of School Buildings. *Quarterly of the National Fire Protection Association*, Vol. 12, No. 1, 1918.
  94. RIPLEY, J.A. 1965. *The Elements and Structure of the Physical Sciences*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
  95. ROBERTSON, A.F. 1981. *Roots and History of Committee E-5*. ASTM Standardization News, Volume 9, No 12, pp. 14-20.
  96. ROHSENOW, W.M., HARTNETT, J.P. 1973. *Handbook of Heat Transfer*. New York: McGraw- Hill Book Company.
  97. ROTHERMEL, R.C.A. 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, USDA Forestry Service, Res. INT-115, 1972.
  98. SENSENIG, D.L., PARKER, W.J. 1978. *New Concept for Rate of Heat Release Measurements by Oxygen Consumption*. The Combustion Institute/Eastern Section, Pittsburgh.
  99. STEINER, A.J. 1944. *Fire Hazard Classification of Building Materials*. Underwriters Laboratories, Inc., Bulletin of Research No. 32, 1944.
  100. STN ASTM E 537: 2002. *Štandardná skúšobná metóda stanovenia tepelnej stability chemických látok metódami termickej analýzy*.
  101. STN EN 924: 2003. *Lepidlá. Rozpúšťadlové a bezrozpúšťadlové lepidlá. Stanovenie bodu vzplanutia*.
  102. STN EN 60332-1-2: 2005. *Skúšky elektrických a optických káblov v podmienkach požiaru. Časť 1-2: Skúška samostatného izolovaného vodiča alebo kábla proti vertikálnemu šíreniu plameňa. Postup pre 1 kW zmiešaný plameň*.
  103. STN EN 14522: 2006. *Stanovenie teploty vznietenia plynov a pár*.
  104. STN EN 50399: 2017. *Spoločné metódy skúšok káblov v podmienkach požiaru. Meranie uvoľňovania tepla a tvorby dymu na kábloch počas skúšky šírenia plameňa. Skúšobné zariadenia, postupy, výsledky*.
  105. STN EN 1363-1: 2013. *Skúšanie požiarnej odolnosti. Časť 1 Základné požiadavky*.

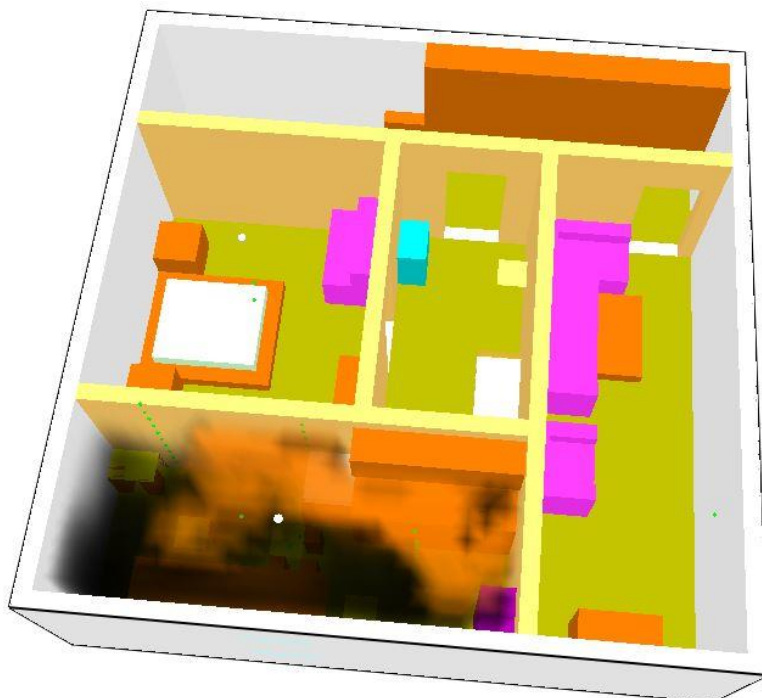
106. STN EN ISO 4589-2: 2001: *Plasty. Stanovenie horľavosti metódou kyslíkového čísla. Časť 2: Skúška pri teplote okolia.*
107. STN EN ISO 2592: 2003. *Ropné výrobky. Stanovenie bodu vzplanutia a horenia. Clevelandova metóda v otvorenom téglíku.*
108. STN EN ISO 1182: 2010. *Skúšky reakcie stavebných výrobkov na oheň. Skúška nehorľavosti.*
109. STN EN ISO 11357-1:2010-04. *Plasty. Diferenčná snímacia kalorimetria (DSC). Časť 1: Všeobecné princípy.*
110. STN EN ISO 11925-2: 2011. *Skúšky reakcie na oheň. Zapáliteľnosť stavebných výrobkov vystavených priamemu pôsobeniu plameňového horenia. Časť 2: Skúška jednoplameňovým zdrojom.*
111. STN EN ISO 9239-1: 2011. *Skúšky reakcie podlahových krytín na oheň. Časť 1: Určovanie správania sa pri horení s použitím zdroja sálavého tepla.*
112. STN EN ISO 2719: 2016. *Určovanie bodu vzplanutia. Metóda v uzavretom téglíku podľa Penského-Martensa.*
113. STN EN ISO 3679: 2017. *Stanovenie vzplanutia a nevzplanutia a bodu vzplanutia. Rýchla rovnovážna metóda v uzavretom téglíku.*
114. STN ISO 1928: 2003-07. *Tuhé palivá. Stanovenie spalného tepla a výpočet výhrevnosti.*
115. STN ISO 871: 2010. *Plasty. Stanovenie zápalnosti v teplovzdušnej peci.*
116. STREETER, V.L. 1962. *Fluid Mechanics. 3rd Edition, New York: McGraw-Hill Book Company.*
117. ŠTECKOVÁ, V. 2014. *Počítačová simulácia šírenia dymu v hale. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 31 s.*
118. ŠTOFIRA, J. 2013. *Výpočet a modelovanie parametrov vnútorného požiaru pri riadení dymu. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013, s.175.*
119. TAYLOR, S. et al. 1996. *SMARTFIRE: An Integrated Computational Fluid Dynamics Code and Expert System for Fire Field Modelling. FSEG - UNIVERSITY of GREENWICH, 96/IM/15, August 1996.*
120. TEREŇOVÁ, L., HAKOŠ, J. 2016. *The fire resistance of linear joints of the fire safety facings and their ability of the protection against fire in wooden buildings. In Wood & fire safety: proceedings of the 8th international scientific conference: the High Tatras, Štrbské Pleso, the Hotel Patria, Slovakia, May, 8.-12.2016 / eds. Linda Makovická Osvaldová, Jaroslava Panáková. Žilina: EDIS - Publishing center of the University of Žilina, 2016. ISBN 978-80-554-1201-6. P. 337-345.*
121. TEREŇOVÁ, L. 2017. *Impact of material composition on the fire safety of wood buildings structural elements. In Fire protection, safety and security 2017: international scientific conference, May 3rd - 5th, 2017, Zvolen, Slovak Republic: conference proceedings / eds. Andrea Majlingová, Veronika Veľková. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2017. ISBN 978-80-228-2957-1. P. 235-242.*
122. THOMAS, P.H. 1963. *The Size of Flames from Natural Fires. Ninth Symposium (International) on Combustion. New York: Academic Press, pp. 844–859.*
123. THORNTON, W.M. 1917. *The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds. Phil. Mag. 33, pp. 196-203, 1917.*
124. VALÁŠEK, L. 2012. *Využitie grafického používateľského rozhrania pri simulácii požiaru v stavebnom priestore. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 62 s.*



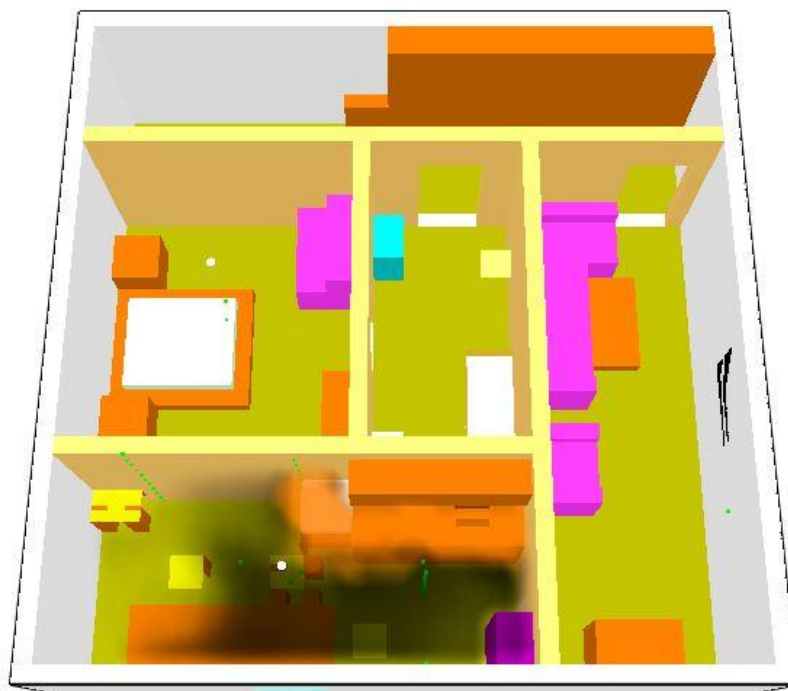
125. WADE, C.A. 2004. BRANZFIRE Technical Reference Guide. BRANZ Study Report No. 92. BRANZ Wellington.
126. WEISENPACHER, P., GLASA, J., HALADA, L. 2012. Parallel simulation of automobile interior fire and its spread onto other vehicles. *Proc. of the Int. Congress on Fire Computer Modeling*, Santander, pp. 329-338.
127. WOOD, A.M. et al. 2008. Applying Fire Models to Fire Protection Engineering Problems and Fire Investigations. Fire Protection Handbook 20th Edition. Quincy: NFPA.
128. WYLD, O. 1735. *British Patent No. 551*.
129. YUILL, C.H. 1962. Flame-Spread Tests in a Large Tunnel Furnace. *Symposium on Fire Test Methods*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
130. ZACHAR, M. et al. 2014. Determination of fire-environmental parameters of selected wooden composites. In *Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology*. ISSN 1898-5912. No. 87 (2014), p. 250-255.
131. ZACHAR, M. et al. 2017. Influence of an age and damage of the oak wood on its fire risk. *WOOD RESEARCH*, Vol. 62, Number 3, 2017, p. 495-504.
132. ZHANG, X. et al. 2010. Effects of Computational Domain on Numerical Simulation of Building Fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 20, 2010, pp. 225-251.
133. ZIKRIA, B.A. 1973. Smoke poisoning in fires. *Polym. Prepr.*, Vol. 14, 1973, pp. 1017-1021.
134. ZUKOSKI, E.E. 1995. *Properties of Fire Plumes. Combustion Fundamentals of Fire*. Cox, G. (ed.). London: Academic Press.

## PRÍLOHY

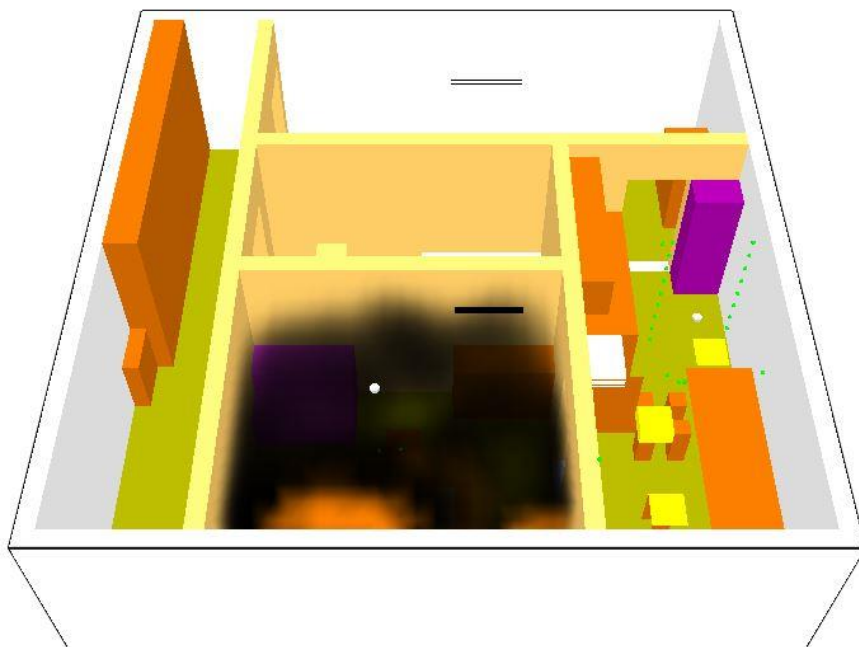
Vizualizácia správania sa požiaru kuchyne vo fáze flashover – 130 s simulácie



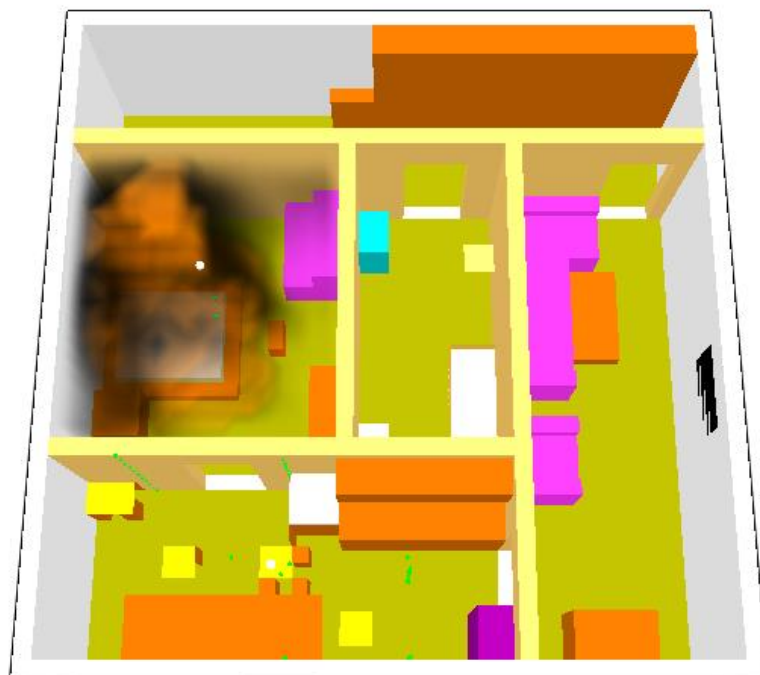
Vizualizácia správania sa požiaru kuchyne pri otvorení okna – 161 s simulácie



**Vizualizácia správania sa požiaru spálne vo fáze flashover – 216 s simulácie**



**Vizualizácia správania sa požiaru spálne pri otvorení okna – 210 s simulácie**



**Modelovanie vnútorných požiarov s využitím výsledkov progresívnych metód  
požiarneho inžinierstva**

Autori:

prof. RNDr. Danica Kačíková, PhD., Technická univerzita vo Zvolene  
doc. Ing. Andrea Majlingová, PhD., Technická univerzita vo Zvolene  
Ing. Veronika Veľková, PhD., Technická univerzita vo Zvolene  
Ing. Martin Zachar, PhD., Technická univerzita vo Zvolene

Recenzenti:

Prof. Ing. Anton Osvald, CSc., Žilinská univerzita v Žiline  
Prof. Ing. Milan Oravec, PhD., Technická univerzita v Košiciach

Vydavateľ: Technická univerzita vo Zvolene, 2017

Grafická úprava: doc. Ing. Andrea Majlingová, PhD.

Preklad do angličtiny: doc. Ing. Andrea Majlingová, PhD.

1. vydanie – Náklad 100 ks (CD-médium) – Strán 147 (10,28 AH, 10,38 VH)

Za jazykovú a odbornú úroveň tejto publikácie zodpovedajú autori a recenzenti. Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-228-3006-5