

Příjemce: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Technický ústav požární ochrany
Vysoké učení technické v Brně
VŠB – TUO Fakulta bezpečnostního inženýrství

Poskytovatel: Česká republika - Ministerstvo vnitra

Projekt s názvem: **Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb**

s identifikačním kódem **VI20162019034**

Název předkládaného výsledku:

Vstupní data do modelů požáru

Typ výsledku dle UV č. 837/2017	Evidenční číslo (příjemce u organizace)	Rok vzniku
(N_{metC}) 1 Metodika schválená příslušným orgánem státní správy, do jehož kompetence daná problematika spadá		2019
ISBN-ISSN	Webový odkaz na výsledek	Č.j. + kdy a kde publikováno
		2019

Anotace výsledku:

Metodika se věnuje problematice definování zdroje hoření pro využití v matematických modelech požáru a definuje požadované vstupy do modelu požáru s ohledem na různé stupně jeho komplexity.

Přínos metodiky spočívá především v komplexním shrnutí současné úrovně poznatků v oblasti definování vstupů do modelů hoření, jednotném, jasném a souhrnném zatřídění modelů hoření dle jejich komplexity, jednoznačném definování oblastí jejich aplikace a úplném popisu vstupních parametrů do modelu. Metodika tak definuje jednotný rámec znalostí.

Metodika nachází uplatnění v oblastech posuzování požární bezpečnosti staveb. Některé z jejích částí jsou využitelné také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru a v oblasti plnění úkolů jednotek požární ochrany. Metodika je určena všem, kteří mají vazbu na dokumentaci požární bezpečnosti staveb:

- zpracovatelům dokumentace požární bezpečnosti staveb,
- projektantům návazných oblastí, ať již jde o obory Pozemní stavby, Statika a dynamika staveb nebo Technická zařízení budov,
- výrobcům materiálů požární ochrany
- a zejména posuzovatelům dokumentace, tedy příslušníkům Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů.

Řešitelský tým:

Ing. Lucie Hasalová, Ph.D.
Ing. arch. Petr Hejtmánek, Ph.D.

MINISTERSTVO VNITRA

Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky
Kloknerova 26, pošt. příhr. 69, 148 01 PRAHA 414

Podle § 7 odst. 5 a v návaznosti na § 7 odst. 2 až 4 zákona č. 239/2000 Sb.,
o integrovaném záchranném systému a změně některých zákonů ve znění
pozdějších předpisů a podle § 26 odst. 1 a § 24 odst. 1 zákona č. 133/1985
Sb., o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů
je vydáno

OSVĚDČENÍ O CERTIFIKACI METODIKY

Číslo : CERO 5/2019

Název metodiky:

Vstupní data do modelů požáru

Dedikace

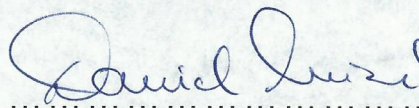
VI20162019034

Zpracovatel metodiky:

Lucie Hasalová

Petr Hejtmánek

V Praze dne 17.9.2019



plk. Ing. Daniel Miklós, MPA
náměstek generálního ředitele HZS ČR
pro prevenci a civilní nouzovou připravenost





Vstupní data do modelů požáru

Název projektu: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VI20162019034)

Poskytovatel: Ministerstvo vnitra České republiky

Obsah

1	Cíle a uplatnění metodiky	4
2	Struktura metodiky	4
3	Jak pevné látky hoří a které procesy přitom probíhají?	5
3.1	Tepelný rozklad.....	6
3.2	Reakční chemie v plynné fázi.....	7
3.2.1	Množství uvolněného tepla.....	7
3.2.2	Produkty spalování	8
3.3	Transport tepla a hmoty v plynné fázi	9
4	Jak můžeme modelovat hoření pevných látek?	9
4.1	Modelování následků přítomnosti zdroje hoření.....	9
4.2	Modelování založené na fyzikálním popisu procesu tepelné degradace.....	10
5	Rozdělení matematických modelů tepelné degradace pevných látek.....	10
5.1	Jednoduché pyrolýzní modely.....	12
5.1.1	Empirické modely	12
5.1.2	Semi-empirické modely.....	13
5.1.3	Analytické modely	14
5.2	Komplexní pyrolýzní modely.....	15
6	Vstupní data do jednoduchých pyrolýzních modelů	17
6.1	Požárně technické charakteristiky látek (PTCH)	17
6.1.1	Rychlost úbytku hmotnosti MLR a rychlost uvolňování tepla HRR.....	17
6.1.2	Efektivní výhřevnost/výhřevnost.....	20
6.1.3	Povrchová teplota při vzplanutí.....	21
6.2	Tepelně technické charakteristiky látek (TTCH).....	23
6.2.1	Hustota a objemová hmotnost.....	23
6.2.2	Součinitel tepelné vodivosti.....	24
6.2.3	Měrná tepelná kapacita	24
6.2.4	Tepelná setrvačnost.....	25
6.3	Ostatní	25
6.3.1	Koeficient přestupu tepla	25
6.3.2	Emisivita povrchu	26
7	Jak vybrat pyrolýzní model?	26

8	Závěr	29
	Reference.....	29
	Seznam obrázků	30
	Seznam tabulek.....	30
	Přílohy	31
	A. Další doporučené zdroje	31
	B. Pro posuzovatele	32

1 Cíle a uplatnění metodiky

Cílem metodiky je:

Jedním z nejzásadnějších kroků v procesu využití matematického modelu požáru v oblasti návrhu a požární bezpečnosti staveb je volba požárních scénářů. Každý požární scénář zahrnuje tři základní oblasti, které ho definují – popis požáru, popis budovy a popis jejích uživatelů. Volba návrhového požáru úzce souvisí s charakteristikami budovy, jako je architektonické uspořádání (např. velké otevřené prostory, interiérové materiály), požární zatížení, vybavení systémy detekce nebo jinými aktivními požárně bezpečnostními zařízeními. Jedná se o faktory, které mohou výrazně ovlivnit rozvoj a šíření požáru, nicméně tím zásadním faktorem je model požáru jako takový.

S ohledem na otázky, které chceme matematickým modelem zodpovědět, se definuje požár, jeho jednotlivé fáze (zda uvažujeme požár v čase konstantní nebo rostoucí) a míru jeho komplexity (zda uvažujeme pouze plně rozvinutou fázi požáru, nebo i jeho rozvoj a dohořívání atd.).

Metodika se věnuje problematice definování zdroje hoření pro využití v matematických modelech požáru a definuje požadované vstupy do modelu požáru právě s ohledem na různé stupně jeho komplexity.

Metodika nachází uplatnění v oblastech posuzování požární bezpečnosti staveb. Některé z jejích částí jsou využitelné také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru a v oblasti plnění úkolů jednotek požární ochrany.

Metodika je určena všem, kteří mají vazbu na dokumentaci požární bezpečnosti staveb:

- zpracovatelům dokumentace požární bezpečnosti staveb,
- projektantům návazných oblastí, ať již jde o obory Pozemní stavby, Statika a dynamika staveb nebo Technická zařízení budov,
- výrobcům materiálů požární ochrany
- a zejména posuzovatelům dokumentace, tedy příslušníkům Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů.

2 Struktura metodiky

Metodika je tematicky rozdělena do následujících kapitol:

- **Kapitola 3** teoreticky popisuje proces tepelné degradace pevných látek a jejich hoření v plynné fázi;
- **Kapitola 4** definuje dva základní přístupy k modelování hoření pevných látek a modely rozděluje do dvou skupin na modely jednoduché a komplexní;
- **Kapitola 5** popisuje modely s důrazem na požadovaná vstupní data;
- **Kapitola 6** popisuje metody měření a stanovení vstupních dat;

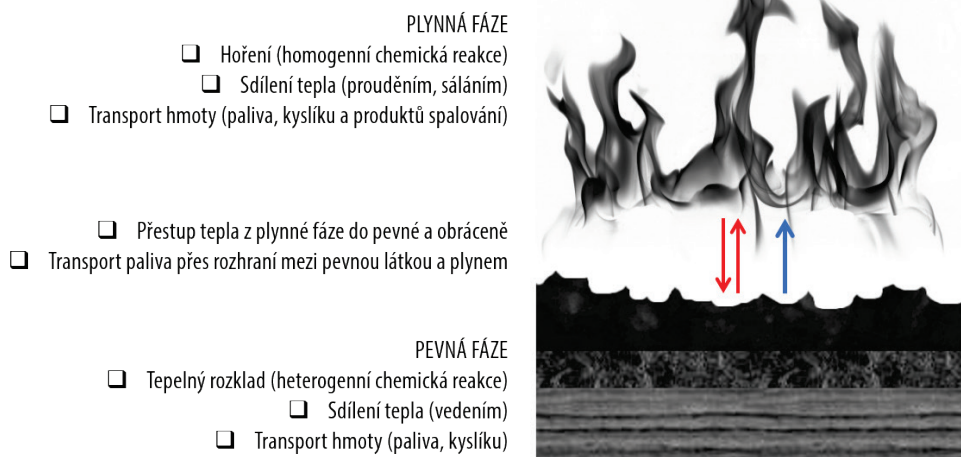
- **Kapitola 7** je určena zejména pro zpracovatele a soustředí se na volbu komplexity modelu vzhledem k materiálu, požadovaným výstupům a možnostem modelu;
- **Příloha B** je určena zejména pro posuzovatele a má usnadnit vymezení typu předkládaného modelu a s ním spojených požadovaných vstupních dat.

3 Jak pevné látky hoří a které procesy přitom probíhají?

Popis procesu hoření pevných látek je nutné rozdělit na dvě části: proces tepelné degradace (pyrolýza) a samotný proces spalování v plynné fázi (hoření). Tyto procesy jsou neoddělitelné a vzájemně se více či méně ovlivňují. Rychlost hmotnostního úbytku pevné látky se rovná rychlosti, s jakou jsou uvolňovány hořlavé plyny. Rychlost uvolňování hořlavých plynů závisí na intenzitě tepelného působení a tedy i na rychlosti a účinnosti spalování hořlavých plynů.

- Při působení tepelné energie pevné látky degradují, dochází k jejich rozkladu. Při tom dochází k uvolňování hořlavých plynů do okolí. Tento proces, bez ohledu na okrajové podmínky, se v oblasti matematického modelování nazývá **pyrolýza**, přestože v jiných oborech se pyrolýzou rozumí pouze proces tepelného rozkladu bez přístupu kyslíku.
- Proces hoření probíhá v plynné fázi. Reakce hoření (spalování) se tedy přímo mohou účastnit pouze plynná paliva. V přítomnosti kyslíku se hořlavé plyny spálí za vzniku spalných produktů a dojde k uvolnění tepla. Uvolněné teplo dále přispívá k tepelné degradaci pevné látky a tak podporuje vznik hořlavých plynů.

Pro matematický popis těchto dějů v pokročilých modelech požáru je třeba si uvědomit, že je třeba popsat zákony zachování hmoty i energie jak v pevné, tak v plynné fázi. Mezi fyzikálně chemické procesy, které při hoření pevných látek probíhají, patří (viz Obr. 1): sdílení tepla (vedením v pevné fázi, prouděním a sáláním ve fázi plynné), přestup tepla mezi plynem a pevnou fází, heterogenní reakce (přechod látky z pevného skupenství do plynného), homogenní reakce (spalování v plynné fázi) a sdílení hmoty (transport paliva, kyslíku a produktů spalování). Jedná se tedy o proces značně komplexní, který je pro účely matematického modelování požáru výrazně zjednodušován. Pro správnou práci s pokročilými modely požáru je třeba rozumět omezením modelů, která použitými zjednodušeními vznikají a nárokům na správnost vstupních dat do modelů.



Obr. 1: Fyzikální a chemické procesy probíhající v pevné a plynné fázi při tepelném rozkladu a hoření.

3.1 Tepelný rozklad

Při tepelném namáhání materiálu probíhá v materiálech celá řada fyzikálně-chemických procesů. Rychlost uvolňování hořlavých plynů je řízena třemi základními procesy: sdílení tepla v pevné fázi, samotný rozklad materiálu a transport hmoty. Procesy jsou zde krátce vysvětleny s důrazem na vstupní parametry, které vystupují v pyrolyzních modelech.

Na materiál působí tepelný tok sáláním i prouděním, jeho povrch se ohřívá a teplo je vedeno dovnitř materiálu. Jaký poměr dopadajícího sálavého tepla je povrchem pohlcen a jaký odražen, je funkcí emisivity povrchu materiálu ε [-]. Některé materiály, například kapaliny, mohou být pro sálavé teplo prostupné, jejich chování pak popíšeme pomocí absorpčního koeficientu K [1/m]. Rychlost vedení tepla materiálem závisí na teplotním gradientu, který je ovlivněn součinitelem tepelné vodivosti (značeno λ nebo k [W/m/K]), specifickou tepelnou kapacitou c_p [J/kg/K] a hustotou (objemovou hmotností) materiálu ρ [kg/m³].

Při dosažení rozkladné teploty dojde k heterogenní reakci, při které se pevná látka přemění na plynnou. Skutečný počet probíhajících reakcí a jejich povahu (zda se jedná o reakce endotermní nebo exotermní) je obtížné určit, může se jednat o desítky až stovky reakcí. Pro zjednodušenou představu uvažujeme často jednu či více souhrnných heterogenních reakcí, do kterých vstupuje pevná látka a odchází hořlavé plyny a případný pevný zbytek (podrobněji viz kapitola 5.2).



Rychlost rozkladné reakce v každém místě pevné látky je funkcí její teploty. Tepelný rozklad neprobíhá pouze při jedné hodnotě teploty, ale přes teplotní interval konečné šířky, který je různý pro různé látky. Rozklad pevné látky proto neprobíhá pouze v jednom místě vzorku, ale v konečně silné vrstvě. Tato takzvaná pyrolyzní fronta se s časem posouvá od povrchu materiálu směrem do středu, jak se materiál postupně prohřívá.

Při tepelném rozkladu jsou po celou dobu různou rychlostí v závislosti na teplotě a porézности materiálu uvolňovány hořlavé plyny. Plyny se pohybují směrem ven z materiálu ve směru koncentračního gradientu. Stejně tak v opačném směru pak může docházet k transportu kyslíku z okolí k rozkladné zóně.

3.2 Reakční chemie v plynné fázi

3.2.1 Množství uvolněného tepla

Výstupem pyrolýzního modelu je rychlost hmotnostního úbytku pevné fáze (Mass Loss Rate – MLR, \dot{m} [kg/s]), který odpovídá rychlosti vývinu hořlavých plynů. Tyto plyny reagují se vzdušným kyslíkem a vytváří celou řadu produktů – spalin. Jako vstup do modelu požáru se často místo MLR uvádí rychlost uvolňování tepla (Heat Release Rate – HRR, \dot{Q} [J/s = W]). Jaký je mezi těmito veličinami vztah?

Reakce spalování jsou reakce exotermické, při kterých je uvolněno velké množství tepla. Každá hořlavá látka uvolní při spálení jednotkového množství různé množství tepla. Množství uvolněného tepla se vyjadřuje pomocí veličiny výhřevnost ΔH_c (J/mol nebo J/kg). Výhřevnost (Net Heat of Combustion) je definována jako množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství látky za standardních podmínek. Reakcí vznikající voda se uvažuje v plynném skupenství. Pokud uvažujeme, že vznikající voda je ve skupenství kapalném, hovoříme o spalném teple (Gross Heat of Combustion). Spalné teplo má pro stejnou látku vyšší hodnotu než výhřevnost, protože se při kondenzaci vodní páry na vodu uvolní další teplo. Při přebírání hodnot z literatury, především zahraniční, je třeba si dát pozor, zda se jedná o výhřevnost či spalné teplo, protože obě veličiny mají stejnou jednotku a v angličtině často i stejné označení. Vodní pára je v prostředí požáru ve formě plynné, proto se při inženýrských výpočtech a v modelech požáru uvažuje výhřevnost.

Výhřevnost se stanovuje v zařízení, kde je známé množství látky spáleno v prostředí čistého kyslíku, nebo výrazném přebytku vzduchu, aby bylo zajištěno dokonalé spálení. Této výhřevnosti je v podmínkách požáru málokdy dosaženo. Ani u požárů dostatečně ventilovaných nedochází k dokonalému stechiometrickému spálení hořlavých plynů. V praxi se často místo „teoretické“ výhřevnosti materiálů udává tzv. efektivní výhřevnost, která v sobě zahrnuje efektivitu spalování v reálných podmínkách. Efektivní výhřevnost lze spočítat ze změřeného hmotnostního úbytku látky při hoření a uvolněného tepla, které se vypočítá na principu kyslíkové kalorimetrie (oxygen depletion calorimetry) např. v kónickém kalorimetru (sekce 6.1.2)

$$\Delta H_{c,eff} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} ,$$

přičemž okamžitý tepelný výkon při spalování pevných látek lze určit při znalosti hmotnostního úbytku látky při hoření ze vztahu

$$\dot{Q} = \chi \cdot \Delta H_c \cdot \dot{m} .$$

Koeficient χ vyjadřuje efektivitu spalování a nabývá hodnot od nuly do jedné. V případě, že chemická reakce v plynné fázi proběhne ve stechiometrickém poměru, dojde k dokonalému spálení, koeficient χ je roven jedné. V normách ČSN je pro efektivní výhřevnost zaveden ekvivalentní pojem „požární výhřevnost“ H_p , koeficient χ je značen jako k_{pl} (viz ČSN 73 0824). Požární výhřevnost se zjišťovala v definovaných podmínkách dle dnes již zrušeného zkušebního postupu ČSN 73 0864, šlo ale pouze o větší kalorimetr, v němž se zkoušený materiál zapálil a za přístupu vzduchu nechal vyhořet.

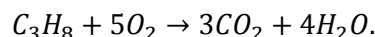
3.2.2 Produkty spalování

Výhřevnost látek přímo ovlivňuje, kolik tepla bude uvolněno do plynné fáze, a tak i vývoj teplotního pole v modelu požáru. Výhřevnost ale neříká nic o tom, jaké produkty spalování vzniknou.

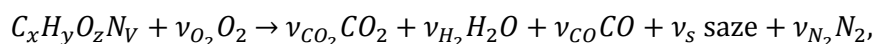
Při hoření pneumatik bude mít vzniklý kouř výrazně jiné složení než kouř při hoření dřeva. Pokud budeme v modelu jako vstup uvažovat pouze uvolněné množství tepla a pro obě látky použijeme totožnou spalnou reakci v plynné fázi, předpověď modelu bude jiná z hlediska množství kouře, protože pneumatiky a dřevo mají jinou výhřevnost a musí být tedy pro uvolnění stejného množství tepla spáleno jiné množství materiálu, ale z hlediska složení kouře budou výsledky totožné. Produkty spalování přitom silně ovlivňují vývoj nejen koncentračního, ale i teplotního pole, protože hlavní produkty spalování – voda, oxid uhličitý a saze – silně ovlivňují sdílení tepla sáláním.

V pokročilých modelech požáru je třeba tedy věnovat pozornost i definování spalné reakce z hlediska reaktantů a produktů, ne pouze z hlediska uvolněného množství tepla. Toto se v modelech, do kterých se jako vstup zadává množství uvolněného tepla (empirické a semi-empirické), často opomíjí.

Pro jednoduché látky, zejména plyny a některé hořlavé kapaliny, jsou spalné reakce relativně snadno definovatelné, protože známe chemické složení plynného paliva, které do spalné reakce vstupuje, jako např. propan



U složitějších směsí a pro převážnou část pevných hořlavých látek je ale velmi obtížné definovat spalnou reakci na základě skutečného složení hořlavých par vzniklých tepelnou degradací látky. V modelech požáru je třeba definovat obecnou spalnou reakci tak, aby co nejlépe reprezentovala skutečnou spalnou reakci v celé šíři teplot. Jeden z nejčastěji používaných pokročilých modelů požáru FDS (McGrattan, Hostikka, McDermott, Floyd, & Vanella, 2019) uvádí obecnou spalnou reakci ve tvaru



kde uhlovodík reaguje s kyslíkem za vzniku vodní páry, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého a sazí. ν jsou stechiometrické koeficienty, tedy množství jednotlivých látek. Proto, aby modelová spalná reakce co nejvíce odpovídala skutečné reakci, slouží jako vstup do modelů požáru tzv. podíl sazí a podíl CO. Jedná se o bezrozměrnou veličinu udávající kolik kilogramů spalin nebo CO vznikne

při spálení jednoho kilogramu paliva. Ze stechiometrie reakce je pak možno dopočítat stechiometrické množství všech reaktantů a zbylých produktů. Zadáním nenulového podílu CO v produktech spalování říkáme, že spalování neprobíhá dokonale až na vznik CO₂.

Kromě křivky tepelného výkonu musí být volba spalné reakce, tedy volba plynného paliva a jeho hodnoty podílu sazí a CO, nedílnou součástí definování požáru v pokročilých modelech i u jednoduchých pyrolýzních modelů.

Velmi často modelujeme případ, kdy nehoří pouze jeden materiál. Každý materiál degraduje jinak, a v plynné fázi tak dochází ke spalování více druhů paliva. Většina modelů požáru, respektive většina výpočetních nástrojů, ale pro snížení výpočetní náročnosti uvažuje, že probíhá pouze jedna spalná reakce. Pokud v modelu uvažujeme více než jeden hořlavý materiál, všechny musí uvolňovat jeden a ten samý plynný produkt, který pak podstupuje proces spalování. To, aby bylo při hoření v modelu uvolněno množství tepla odpovídající spalování plynných produktů daného materiálu, je zajištěno díky použitím odlišných hodnot efektivní výhřevnosti pro každý hořlavý materiál.

3.3 Transport tepla a hmoty v plynné fázi

Předpověď vývoje koncentračního a teplotního pole v prostoru vzhledem k umístění zdroje hoření je problematikou modelování transportu hmoty a sdílení tepla v plynné fázi a není předmětem této metodiky. V kontextu metodiky je třeba si ale uvědomit, že spolu procesy probíhající v plynné a pevné fázi souvisí a že pro úspěšnou předpověď modelu požáru nestačí nastavit dobře zdroj hoření, ale je třeba uvažovat i nastavení řešiče plynné fáze. O modelu požáru z hlediska plynné fáze hovoří metodika „Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů“.

4 Jak můžeme modelovat hoření pevných látek?

Matematické modely požáru je třeba z hlediska požadavků na vstupní data dělit do dvou kategorií odlišných skupin. Zpracovatel musí jednoznačně vymezit, jaký přístup k tvorbě zdroje hoření pro daný scénář zvolil (je předkládán k posouzení) a zdůvodnění.

4.1 Modelování následků přítomnosti zdroje hoření

Převážná část matematických modelů, které jsou v současnosti využívány v oblasti požární bezpečnosti staveb, spadá právě do této kategorie. Tato skupina modelů reprezentuje to, jak dnes umíme využívat zónové modely a modely typu pole (CFD modely) a jak jsou vnímány a využívány v požárněinženýrských přístupech (PBD z anglického Performance-Based Design, (Hurley & Rosenbaum, 2015)).

Průběh vývinu tepla a spalných produktů zadává uživatel jako vstup. Nemodelujeme rozvoj požáru, ale ověřujeme následky požáru, jehož velikost a průběh byl specifikován uživatelem.

Následky přítomnosti zdroje hoření v objektu nebo na otevřeném prostranství rozumíme vývoj teplotního pole a koncentračního pole (zplodin) v čase a prostoru vzhledem k umístění zdroje. Cílem modelu je pak studovat interakci s okolním prostředím – vliv na konstrukce, funkce systémů požární ochrany (např. čas do spuštění, počet aktivovaných zařízení atd.) a pohyb osob (zakouření atd.).

Jelikož požár je vstupem do modelu, není možno tyto modely z principu použít pro simulaci rozvoje požáru a jeho šíření. Pokud jsou takto použity, jedná se o zjednodušení, kde rychlost šíření je předepsána uživatelem jako vstup. Cílem modelu není předpovědět šíření požáru, ale napodobit šířící se požár a předpovědět jeho následky, stejně jako u lokálního požáru.

Terminologie dělení modelů požáru vzhledem k jejich schopnosti modelovat tepelný rozklad materiálů označuje tyto modely jako jednoduché pyrolýzní modely (viz sekce 5.1). Jako vstupní data slouží požárně technické případně tepelně technické charakteristiky materiálů (PTCH a TTCH), jejichž hoření chceme modelovat.

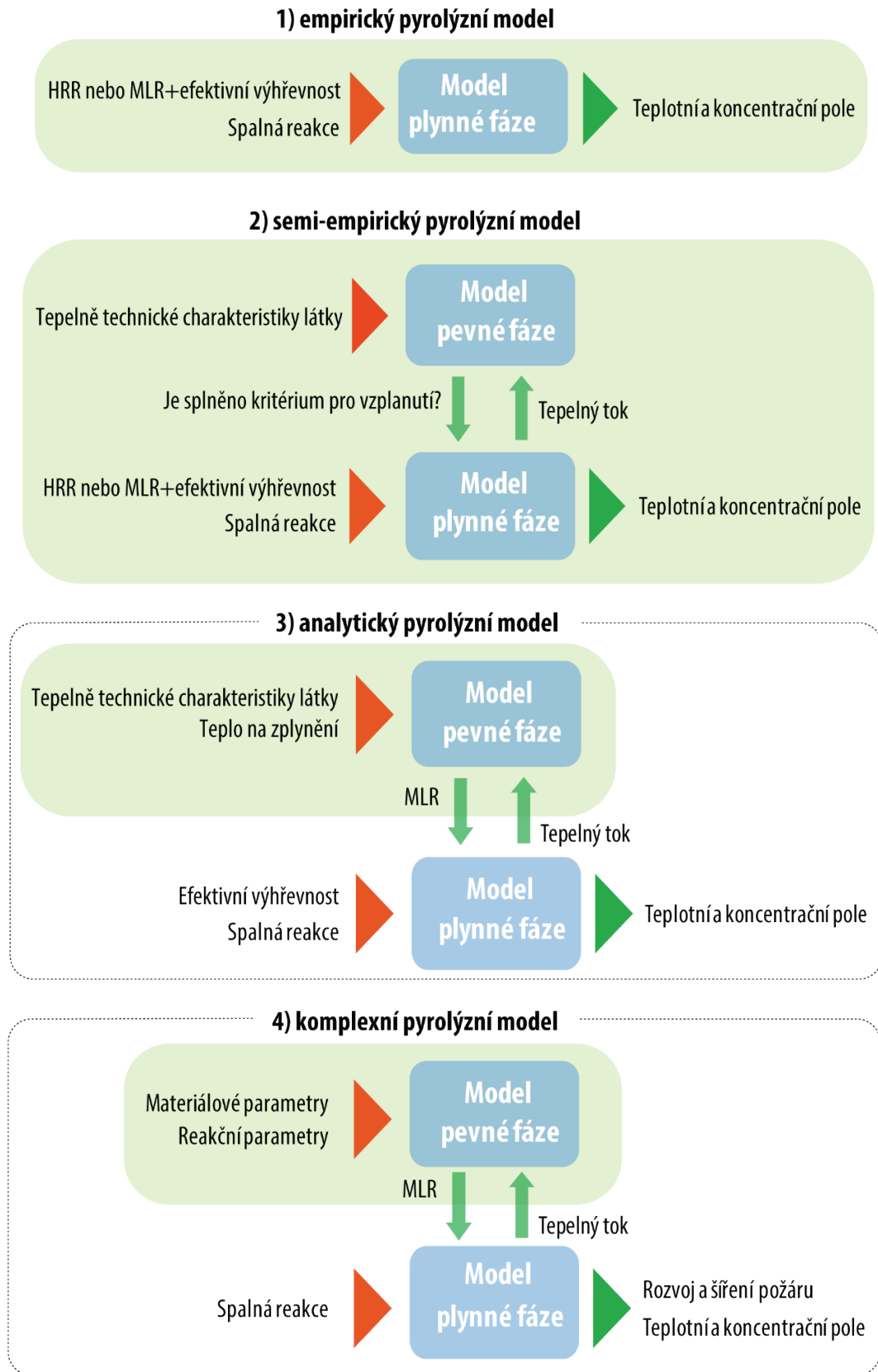
4.2 Modelování založené na fyzikálním popisu procesu tepelné degradace

Modely požáru, které implementují matematický popis procesů tepelné degradace tak, jak byly stručně popsány v sekci 3.1, ze své podstaty umožňují simulovat rozvoj požáru a jeho šíření. Vstupem do modelu jsou tepelně technické charakteristiky látek a další materiálové vlastnosti spolu s tzv. reakčními parametry (sekce 5.2). Rychlost hmotnostního úbytku materiálu (MLR) a rychlost vývinu tepla (HRR) jsou modelem vypočítávány. Tyto PTCH tedy nejsou uživatelským vstupem. Modely dále stejně jako v předchozím případě předpovídají následky vzniklého požáru.

Tyto modely se označují jako komplexní pyrolýzní modely (comprehensive pyrolysis models). Jejich využití v inženýrské praxi je značně limitované. V současné době neexistuje standardizovaná metoda získávání vstupních dat do komplexních pyrolýzních modelů. Celý proces je doprovázen řadou voleb uživatele a klade důraz na validaci použitých postupů a vstupních dat. Využití komplexních pyrolýzních modelů stojí na hraně vědecko-výzkumných aplikací.

5 Rozdělení matematických modelů tepelné degradace pevných látek

Model požáru a model pyrolýzy jsou dva rozdílné modely. Modelem pyrolýzy získáváme vstupní informace pro model hoření, který probíhá v plynné fázi. Stejně jako pyrolýzní modely, může mít model požáru v plynné fázi různou úroveň komplexity od jednoduchých analytických modelů, přes zónové modely až po modely typu pole (viz Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů). Dělení pyrolýzních modelů, jejich vztah obecně k modelům požáru bez ohledu na jejich komplexitu, vstupní data a výstupy modelu jsou uvedeny na schématu 2.



Obr. 2: Vazba mezi vstupy do modelu požáru a jejich komplexitou.

5.1 Jednoduché pyrolýzní modely

Jednoduché pyrolýzní modely „ignorují“ fyzikálně-chemický proces rozkladu pevných materiálů. Snaží se vytvořit reprezentativní požár, který by mohl v daném prostoru vzniknout a sledují interakci požár – konstrukce, požár – evakuace, požár – detekce/systémy ZOKT.

Tvorba návrhového požáru je vždy individuální pro každý požární scénář a odvíjí se od dvou základních otázek:

- Co je zdroj vznícení? Tedy jaký objekt hoří první a jak velký požár vygeneruje?
- Bude se požár od zdroje rozšiřovat?

Na základě odpovědí na tyto dvě otázky mohou nastat dvě situace:

- A. **Zdroj hoření bude jako jeden (fiktivní) objekt**, jehož hoření reprezentuje buď hoření pouze zdroje požáru, nebo všech objektů v celém daném prostoru, přičemž šíření požáru mezi nimi nás nezajímá. Snažíme se vytvořit modelový požár, který svou velikostí odpovídá tomu, jaký požár by se za daných podmínek mohl vyvinout. Klíčové je správně určit:
- 1) Maximální tepelný výkon, který lze očekávat, a zda tato hodnota bude limitována palivem nebo ventilací.
 - 2) Odhadnout dobu trvání jednotlivých fází požáru.
- B. **Zdrojem hoření bude víc samostatných objektů**, každý bude mít svoji vlastní křivku tepelného výkonu, pro kterou musím stejně jako v předchozím případě správně určit maximální tepelný výkon a dobu trvání jednotlivých fází požáru. Výsledná křivka je pak dána superpozicí jednotlivých křivek pro dané objekty/předměty.

Doba trvání jednotlivých fází požáru je schematicky popsána v metodice „Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb“.

5.1.1 Empirické modely

V uživatelsky definovaném čase dojde ke vzplanutí objektu, předmětu nebo jejich sestavy a hoří dle uživatelsky stanovené výkonové křivky požáru

$$HRR = HRR_{exp} = \Delta H_{c,eff} \dot{m}_{exp} \quad \text{pro } t > t_{ig} .$$

Výhody:

- Lze je aplikovat na všechny typy materiálu bez ohledu na jejich strukturu, chování při hoření i jejich geometrické uspořádání. Empirické modely pracují s představou fiktivního objektu. Často se používají u objektů složených z velkého množství materiálů nebo s komplikovanou geometrií. Dále se využívají u materiálů, jejichž chování při hoření dokážeme jen těžko fyzikálně popsat a namodelovat jako je tání, odkapávání, výrazná změna objemu atd.
- Vyžadují minimální množství vstupních dat, pro které máme dostupné způsoby měření.

Nevýhody:

- Předpokládáme, že „tepelná historie“, které byl vzorek vystaven při experimentu, je stejná jako v modelu – není téměř nikdy pravda.
- Není zpětná vazba – dojde-li ke změně tepelného zdroje v modelu, změní se ventilační podmínky, změní se proudění, dojde k ochlazení nebo ohřátí prostředí atd. – chování materiálů z hlediska hoření se tomu nepřizpůsobí – materiál začne hořet v daném čase a hoří takovou rychlostí, jakou jsme specifikovali.

Tabulka 1: Vstupní data do empirických modelů

HRR	Rychlost vývinu tepla	nebo	MLR	Rychlost hmotnostního úbytku
			$\Delta H_{c,eff}$	Efektivní výhřevnost
t_{ig}	Čas do vzplanutí			

5.1.2 Semi-empirické modely

Semi-empirické modely předpovídají prohřívání látky a vzplanutí, hoření je ale řízeno uživatelem. Čas do vzplanutí je počítán softwarem na základě energetické bilance pevné látky a výpočtu vedení tepla materiálem. Jakmile povrchová teplota materiálu dosáhne zadané teploty vzplanutí, materiál začne hořet. Po vzplanutí je stále počítáno sdílení tepla v pevné fázi, ale povrchová teplota ani teplota uvnitř materiálu neovlivňují rychlost hoření a obráceně. Materiál hoří dle výkonové křivky požáru, jak bylo zadáno uživatelem.

Výhody:

- Semi-empirickým modelem lze napodobit scénář šíření hoření od zdroje.
- Objekt až do té doby, než začne hořet, odráží podmínky v modelu (vystavení tepelnému toku, ventilace atd.).

Nevýhody:

- Jakmile začne objekt hořet, hoří uživatelem specifikovanou rychlostí a výkonem. Šíření hoření od zdroje tedy lze napodobit, nicméně s ohledem na pevně zadané vstupní parametry jej není možné předpovídat.
- Neuvažujeme-li v energetické bilanci reakční teplo (sekce 5.2 a 6.1.3), tedy teplo, které je třeba dodat materiálu, aby došlo k tepelnému rozkladu pevné látky, modelem předpovídaná povrchová teplota materiálu je nadhodnocena. Uvažujeme-li v modelu rozkladné reakční teplo, uživatelem zadaný tepelný výkon je tomu úměrně snížen. Nedojde tak k umělému nárůstu povrchové teploty vlivem zjednodušené modelové představy jako v předchozím případě.
- V rovnici pro vedení tepla materiálem vystupují tepelně technické charakteristiky látky - hustota, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Mnoho materiálů má TTCH proměnné s teplotou. Většina dostupných dat v literatuře ale uvádí TTCH naměřená při pokojové teplotě viz sekce 6.2.

Tabulka 2: Vstupní data do semi-empirických modelů.

HRR	Rychlost vývinu tepla	nebo	MLR	Rychlost hmotnostního úbytku
			$\Delta H_{c,eff}$	Efektivní výhřevnost
T_{ig}	Povrchová teplota při vzplanutí			
ΔH_r	Reakční teplo			
ρ	Hustota/objemová hmotnost			
$\lambda(k)$	Součinitel tepelné vodivosti			
c_p	Měrná tepelná kapacita			
ε	Emisivita			

5.1.3 Analytické modely

Analytické modely předpovídají jak prohřívání látky, tak rychlost uvolňování hořlavých plynů. Při dosažení povrchové teploty odpovídající teplotě povrchu při vzplanutí začne materiál hořet ustáleným výkonem a teplota povrchu zůstane konstantní, rovna teplotě vzplanutí. Tepelný výkon při hoření je dán součinem efektivní výhřevnosti a rychlosti úbytku hmotnosti pevné látky. Ta je modelem počítána na základě energetické bilance na povrchu pevné látky a znalosti tepla pro zplynění pevné látky.

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } t < t_{ig} \\ \frac{\Delta H_{c,eff}}{\Delta H_g} q_{net}(t) & \text{pro } t > t_{ig} \end{cases}$$

ΔH_g je množství tepla, které je třeba dodat jednotkovému množství pevné látky, aby vytvořila jednotkové množství hořlavých plynů při teplotě vzplanutí, jestliže byla látka původně při okolní teplotě (teplo na zplynění pevné látky). q_{net} je celkový tepelný tok působící na povrch pevné látky. Je součtem externího tepelného toku, který na povrch působí, a tepelných ztrát konvekcí a radiací a je vysvětlen spolu s teplem pro zplynění v sekci 6.1.3.

Analytické modely jsou jakýmsi mezistupněm mezi empirickými a komplexními modely. Hlavní nevýhodou analytických modelů je to, že je třeba uvažovat velké množství modelových představ pro správnou definici, aplikaci a interpretaci výsledků a lze je použít jen pro omezené množství materiálů a jejich geometrických uspořádání, aby těmto předpokladům vyhovovaly.

- Základním předpokladem analytických modelů je, že pyrolýza probíhá pouze na povrchu pevné látky.
- Většina modelů uvažuje vedení tepla pouze jednorozměrné, kolmo na povrch materiálu. Tento předpoklad lze brát jako oprávněný u objektů typu desky atd., kde lze zbylé dva rozměry vzhledem k tloušťce materiálu považovat za nekonečně dlouhé. Toto však nelze předpokládat u většiny objektů (nábytku). Existují modely, které uvažují vedení tepla ve všech třech směrech. S tím se ovšem zvyšuje výpočetní náročnost.
- V některých případech lze uvažovat, že materiál má v celé tloušťce v daném čase stejnou teplotu (z angličtiny thermally thin). Většinou ale uvažujeme teplotní profil skrze tloušťku materiálu (z angličtiny thermally thick). Podle toho je třeba uvažovat tvar rovnice pro vedení tepla v energetické bilanci.

- Musíme definovat okrajové podmínky. Obvykle uvažujeme konstantní tepelný tok na povrchu a izolovanou zadní stranu materiálu. Lze ale uvažovat i tepelný tok proměnný v čase, vypočtený řešičem plynné fáze.

Tabulka 3: Vstupní data do analytických modelů

T_{ig}	Teplota povrchu při vznícení		
$\Delta H_{c,eff}$	Efektivní výhřevnost		
ΔH_g	Teplo na zplynění		
ρ	Hustota/objemová hmotnost	nebo	$\lambda\rho c$ Tepelná setrvačnost
$\lambda(k)$	Součinitel tepelná vodivosti		
c_p	Měrná tepelná kapacita		
ε	Emisivita		
h_c	Koeficient přestupu tepla		

5.2 Komplexní pyrolýzní modely

V následujícím textu jsou komplexní pyrolýzní modely popsány v omezeném rozsahu tak, aby posuzovatel dokázal komplexní pyrolýzní model rozpoznat a identifikovat potřebná vstupní data. Pro detailní popis problematiky komplexních pyrolýzních modelů je čtenář odkázán na literaturu (Kim & Dembsey, 2012), (Lautenberger & Fernandez-Pello, Pyrolysis modeling, thermal decomposition and transport processes in combustible solids, 2008), (Lautenberger, A generalized pyrolysis model for combustible solids, 2007).

Základem každého komplexního pyrolýzního modelu je výpočet bilance hmoty a energie v pevné fázi, pomocí nichž popíšeme procesy, které při tepelném rozkladu probíhají. Tyto procesy byly stručně popsány v sekci 3.1. Metodika dále nerozvíjí modely, které uvažují sdílení tepla mezi pevnou látkou a plynem v pevné fázi a transport hmoty v pevné fázi, a s tím související vstupní data do modelů nejsou zmíněna.

Výstupem komplexního pyrolýzního modelu je rychlost uvolňování hořlavých plynů. Komplexní modely se dělí do dvou skupin podle toho, zda uvažujeme, že rozkladná reakce probíhá konečně nebo nekonečně rychle.

Uvažujeme-li, že *rychlost reakce je výrazně vyšší než rychlost procesů sdílení tepla*, můžeme považovat rozkladnou reakci za nekonečně rychlou. Reakce pak probíhá na nekonečně tenké vrstvě v tzv. pyrolýzní zóně, kde při dosažení pyrolýzní teploty dojde k odebrání reakčního tepla a tvorbě produktů rozkladné reakce. Pyrolýza může probíhat pouze na povrchu, nebo se pyrolýzní zóna posouvá směrem od povrchu (u materiálů, které nechávají při rozkladu pevný zbytek). Rychlost uvolňování hořlavých plynů se určuje z energetické bilance v pyrolýzní zóně, pyrolýzní teplota se určuje z výpočtu teplotního profilu v pevné látce.

Předpoklad, že procesy sdílení tepla jsou výrazně pomalejší než rozkladná reakce, můžeme považovat za platný v případě vysokých tepelných toků, působících na povrch pevné látky. Při nižších tepelných tocích již *reakci nelze považovat za nekonečně rychlou*, probíhá v konečně silné vrstvě materiálu a je třeba určit její rychlost. Reakční rychlost je funkcí teploty. Model počítá teplotní profil v pevné fázi z energetické bilance. Pro výpočet teplotního profilu je třeba znát

materiálové vlastnosti pevné látky, mezi které patří hustota, tepelně-technické charakteristiky látky a optické vlastnosti látky. Na základě teploty pevné fáze je pak určena reakční rychlost. Rychlost tvorby hořlavých plynů se počítá z hmotnostní bilance.

Parametry komplexních modelů jsou v základním výčtu shrnuty v tabulce na konci kapitoly. Jedná se o relativně velké množství parametrů, uvědomíme-li si, že je musíme určit pro všechny látky včetně produktů a meziproduktů a pro všechny reakce, které v rozkladném schématu uvažujeme. Jedním z hlavních důvodů, proč komplexní pyrolýzní modely přetrvávají spíše v rovině výzkumné, je kromě jejich složitosti právě velké množství vstupních dat a chybějící ověřené metody, jak tato data získat. V principu existují dvě možnosti získávání dat do komplexních modelů – měření a využití metod numerické optimalizace. Měření je preferováno, protože měřením získáme hodnoty, které jsou libovolně přenositelné mezi komplexními modely. Velkou část parametrů komplexních modelů ale přímo měřit neumíme. Numerickou optimalizací můžeme získat celou sadu vstupních parametrů najednou, ale lze ji použít pouze pro konkrétní model, pro který byla stanovena.

At' jsou vstupní data získána jakýmkoliv způsobem, musí být kladen důraz na jejich validaci. Validací rozumíme srovnání hmotnostního úbytku předpovězeného modelem s použitými parametry s rychlostí úbytku hmotnosti získaným laboratorními zkouškami malých a středních měřítek jako je termogravimetrická analýza a kónická kalorimetrie.

Již bylo naznačeno v úvodu, že tepelný rozklad látek je z hlediska reakční chemie značně komplikovaný proces jak v pevné fázi, tak v plynné fázi. Skutečné množství probíhajících reakcí může být vysoké, vznikají meziproducty reakcí, reakce mohou být paralelní či následné. Pro specifické účely, jako je třeba spalování biomasy, existují vysoce detailní rozkladná schémata. V oblasti modelování požáru si ale nemůžeme takovou úroveň detailu dovolit ze dvou důvodů: velmi obtížně či vůbec neumíme určit vstupní parametry a při jejich vysokém počtu se model požáru stává neprakticky výpočetně náročným.

Základním problémem je, jak stanovit rozkladné schéma. Je vždy třeba určit kompromis mezi jednoduchostí, a tím i malým množstvím parametrů, a dostatečně podrobným popisem tak, aby schéma dostatečně vystihovalo tepelný rozklad. Schéma tepelného rozkladu se určuje na základě výstupů z měření dvou metod termické analýzy – termogravimetrie (TG) a diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC). Termogravimetrická analýza poskytne informaci o rychlosti hmotnostního úbytku v čase při zahřívání látky. Z TG křivky jde dále odečíst, v jakém teplotním rozsahu probíhá tepelný rozklad a v kolika krocích. Lze tedy určit minimální počet rozkladných reakcí a také pro každou reakci určit reakční (kinetické) parametry A , E , n . Se znalostí těchto parametrů je pak možno určit reakční rychlost, tedy rychlost tepelného rozkladu v závislosti na teplotě.

Diferenční kompenzační kalorimetrie odhaluje povahu probíhajících reakcí, tedy zda se jedná o reakce endotermní či exotermní a z DSC křivky lze spočítat energii, kterou reakce spotřebují nebo která se uvolní, tedy reakční teplo reakcí ve schématu tepelného rozkladu.

TGA i DSC jsou standardními metodami termické analýzy. Pro úspěšné stanovení reakčních parametrů je ale třeba udělat řadu uživatelských voleb. Klíčová volba je rychlost ohřevu vzorku a volba atmosféry, ve které bude rozklad probíhat (standardně vzduch nebo dusík).

Tabulka 4: Vstupní data do komplexních pyrolýzních modelů.

	Konečně rychlá reakce		Nekonečně rychlá reakce
A	Aktivační energie	T_p	Pyrolýzní teplota
E	Pre-exponenciální faktor	ΔH_r	Reakční teplo
n	Řád reakce		
ΔH_r	Reakční teplo		
ρ	Hustota/objemová hmotnost		
$\lambda(k)$	Součinitel tepelné vodivosti		
c_p	Měrná tepelná kapacita		
ϵ	Emisivita		
K	Absorpční koeficient		

6 Vstupní data do jednoduchých pyrolýzních modelů

6.1 Požárně technické charakteristiky látek (PTCH)

Požárně technické charakteristiky látek popisují chování látky při hoření a při procesech s hořením souvisejících. Jedná se o širokou skupinu parametrů, z nichž jsou zde krátce popsány pouze ty nejdůležitější, které vystupují v modelech tepelné degradace látek a modelu hoření v plynné fázi. Důraz je kladen na metody, kterými se parametry měří a vliv těchto metod na aplikovatelnost dat do modelů. Větší soubor více či méně nutných vstupních parametrů lze najít v (Dvořák, 2016). V příloze A jsou uvedeny odkazy na volně dostupné databáze či zdroje vstupních dat do modelů a souvisejí metodické návody využití pokročilých modelů požáru v oblasti požární bezpečnosti staveb ze zahraničí.

6.1.1 Rychlost úbytku hmotnosti MLR a rychlost uvolňování tepla HRR

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
ANO	ANO	X	X

Informace o rychlosti hmotnostního úbytku a rychlosti vývinu tepla jsou primárními vstupy do empirických a semi-empirických modelů. Ty tvoří v dnešní době převážnou část modelů požáru v oblasti požární bezpečnosti staveb. Správné porozumění těmto hodnotám, jak byla data naměřena a jak je interpretovat a využít v modelu požáru, je klíčové pro kvalitu předpovědi modelu.

Rychlost hmotnostního úbytku pevné látky (MLR)

MLR může být experimentálně měřeno v mnoha uspořádáních. Základem měření je kontinuální vážení a záznam hmotnosti pevné látky při jejím hoření. Rychlost hmotnostního úbytku je pak vypočtena jako derivace hmotnosti podle času nejčastěji numericky s využitím vícebodových náhrad. MLR je tedy hodnota vypočtená, ne přímo měřená. Její hodnota závisí na časovém kroku

záznamu hmotnosti respektive na zvoleném časovém kroku pro její výpočet. Ty nemusí být nutně stejné. Typicky při časovém kroku záznamu jedna sekunda MLR silně osciluje a křivka obsahuje hodně šumu. Čím vyšší časový krok, tím více dochází k vyhlazení MLR křivky. Při příliš vysokém časovém kroku ale může dojít k výraznému zkreslení jejího tvaru a posunutí polohy maxima MLR atd. Při měření MLR na kónickém kalorimetru dle ISO 5660-1 je doporučen standardní čas záznamu 5 sekund, pakliže se nejedná o vzorky hořící méně než tři minuty a pro výpočet MLR je použita pětibodová náhrada.

Rychlost vývinu tepla (HRR)

Jak již bylo uvedeno v sekci 3.2.1, rychlost vývinu tepla (HRR) při hoření lze vypočítat ze znalosti rychlosti úbytku hmotnosti pevné fáze a výhřevnosti (efektivní výhřevnost) látky. Druhou možností je rychlost vývinu tepla počítat pomocí metody kyslíkové kalorimetrie (Filipi, 2003). Tato metoda vychází z předpokladu, že pro většinu běžných pevných hořlavých látek je jejich výhřevnost vztažená na spotřebu jednotkového množství kyslíku konstantní, rovna přibližně 13,1 MJ/kg kyslíku. Ze spotřeby kyslíku při hoření je tedy možné vypočítat množství uvolněného tepla při hoření. Pro výpočet HRR je tedy třeba jít všechny zplodiny hoření a analyzovat v nich množství kyslíku. Metoda kyslíkové kalorimetrie může být rozšířena o analyzování množství CO a CO₂ ve zplodinách, což slouží pro zpřesnění výpočtu HRR nebo u stanovení HRR látek, které při svém hoření produkují kyslík.

Data MLR a HRR můžeme hledat v literatuře nebo naměřit dle postupů popsaných výše. V principu lze data MLR a HRR získat ze dvou typů experimentů:

1) Experimenty středního a velkého měřítka

Je spálen celý objekt nebo dokonce celá sestava. Při experimentu je měřena hmotnost, dopočítáváno MLR a vynásobením efektivní výhřevností je získáno HRR nebo je počítána rychlost vývoje tepla přímo při experimentu metodou kyslíkové kalorimetrie v zařízeních typu Room corner test (Test v rohu místnosti, ISO 9705-1), nábytkový kalorimetr a kalorimetry středního měřítka. Jednotlivé metody se liší možnou velikostí a možným uvolněným teplem vzorku. U nábytkového kalorimetru se hovoří o maximálním tepelném výkonu přibližně 1 MW, v Room corner testu jsou výkony několikanásobně vyšší.

Výhoda:

- Najdeme-li data z velkorozměrové zkoušky se stejnými/obdobnými materiály a obdobným geometrickým uspořádáním, získáme zdroj informací jak o velikosti požáru, tak i o délce jednotlivých fází požáru. Máme měřítko, že požár, který generují v modelu, výkonově a časovým průběhem, odpovídá realitě.

Nevýhoda:

- MLR, HRR nejsou vztaženy na plochu.
- Přepočítání HRR a MLR na plochu je pro geometricky komplikované objekty složitý. Pokud stejnou geometrii nevytváříme v modelu (to z důvodu značného zjednodušení děláme

málokdy), je třeba HRR a MLR jako vstup do modelu přepočítat na plochu (HRRPUA=Heat Release Rate Per Unit Area).

- Vliv typu, velikosti a pozice iniciačního zdroje.

Způsob zapálení vzorků, a to jak z hlediska umístění, tak typu iniciačního zdroje, hraje významnou roli jak pro určení času do vznícení, tak rozvoje hoření. Iniciační zdroje mohou mít různý tvar, různý výkon a mohou hořet různě dlouhou dobu.

2) Experimenty laboratorního měřítka

Vzorky materiálů, ze kterých se objekt/předmět skládá, spálíme v laboratorním měřítku na zařízení typu kónický kalorimetr (vzorek velikosti 10×10 cm). Vzorky jsou při experimentu vystaveny definovanému zdroji tepla za přítomnosti iniciačního zdroje. Je měřen MLR, metodou kyslíkové kalorimetrie je dopočítáváno HRR a z těchto dvou veličin pak dále efektivní výhřevnost.

Výhody:

- Jasně definovaný zdroj tepla.
- MLR a HRR lze velmi jednoduše vztáhnout na plochu.
- Měření v laboratorním měřítku mohou při vhodné instrumentaci měření a aplikaci analytických postupů dále poskytnout data o povrchové teplotě při vzplanutí a kritickém toku pro vzplanutí. Tyto údaje jsou důležité podklady pro analýzu, zda dojde k šíření požáru od zdroje a tomu odpovídající nastavení zdroje požáru v modelu, ale také přímo možné vstupní hodnoty do modelu.

Nevýhoda:

- Velikost (měřítka) zkoušky a měřítka použité v modelu – problém extrapolace dat.
- Z tvaru MLR nebo HRR křivky nelze vyvozovat informace o fázi rozvoje ani dohořívání, ale pouze o maximálním možném dosaženém tepelném výkonu při hoření daného materiálu. Tvar křivky je dán typem materiálu, tloušťkou vzorku, hodnotou působícího tepelného toku a vlivem tepelné izolace vzorku ze zadní strany.
- Při jakém tepelném výkonu zářiče budeme experimenty provádět?
Intenzita tepelného výkonu zářiče silně ovlivňuje rychlost vývinu tepla. Je třeba udělat inženýrskou analýzu, jak budeme data používat v modelu s ohledem na požární scénář – jedná se o pomalu či rychle se rozvíjející požár, v jaké vzdálenosti od zdroje hoření je objekt, jehož tepelný výkon nás zajímá? Je obtížné stanovit obecnou či doporučenou hodnotu intenzity tepelného toku z plamene (zdroje hoření) na okolní objekty pro použití v modelech, protože závisí na velikosti zdroje, jak fyzicky, taky výkonově a dále na vzdálenosti od zdroje. Je třeba vždy uvažovat konkrétní případ pro daný požární scénář. Pro orientaci si lze představit, že dopadající tepelný tok 1 kW/m² odpovídá slunečnímu dni, působení tepelného toku 3-5 kW/m² už je lidské kůži nepříjemné v řádu sekund. Dopadající tepelný tok 20 kW/m² na podlahu sáláním z podstropní vrstvy horkých plynů při požáru v místnosti se uvádí jako limitní hodnota pro dosažení flashoveru. V případě šíření plamene po povrchu látek lze, v závislosti na vzdálenosti a tepelném výkonu zdroje hoření, v literatuře najít hodnoty mezi 40 až 200 kW/m². Limity tepelného výkonu kónického zářiče se běžně pohybují mezi 0-100 kW/m².

- Orientace vzorku.

V kónickém kalorimetru jsou standardně vzorky spalovány v horizontální poloze. Ve skutečnosti ale mohou být materiály využívány ve vertikální poloze (např. obložení, izolační materiály), nebo dokonce může jít o stropní obklad. Měření ve vertikální poloze je možné, zatěžování stropního vzorku není v kónickém kalorimetru možné.

6.1.2 Efektivní výhřevnost/výhřevnost

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
ANO – pokud je vstupováno	ANO – pokud je vstupováno	ANO - NUTNÉ	ANO – pokud je
MLR nebo je modelováno	MLR nebo je modelováno		modelováno hoření více
hoření více rozdílných látek	hoření více rozdílných látek		látek

Rozdíl mezi výhřevností a efektivní výhřevností byl vysvětlen v kapitole 3.2.1. Výhřevnost látek lze stanovit z měření v bombovém kalorimetru (kyslíkový kalorimetr, ČSN EN ISO 1716 - Zkoušení reakce výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla (kalorické hodnoty)). V oblasti požární vědy a inženýrství se také začal využívat pro stanovení výhřevnosti spalovací mikrokolorimetr (Microscale Combustion Calorimeter) (ASTM D7309 – 13: Standard test method for determining flammability characteristics of plastics and other solid materials using microscale combustion calorimetry).

Efektivní výhřevnost lze určit podělením celkového uvolněného množství tepla, které bylo určeno metodou kyslíkové kalorimetrie, rychlostí hmotnostního úbytku látky. Tato veličina je standardním výstupem měření z kónického kalorimetru. Jedná se o veličinu, která se dopočítává. Její aktuální hodnotu lze určit v každém čase měření, ale častěji se jako výstup měření uvažuje průměr za určité časové období. Okamžitá hodnota efektivní výhřevnosti je silně ovlivněna hodnotou MLR, která, jak bylo vysvětleno v předchozí sekci, může silně oscilovat. Dalším důvodem, proč se uvažuje spíše hodnota průměrná než okamžitá, je to, že ačkoliv měření MLR a HRR probíhá ve stejnou dobu, nelze zajistit, že jsou dokonale synchronizovány. To není problém při ustáleném hoření, ale může to vést k významnému zkreslení hodnoty efektivní výhřevnosti při rychlých změnách intenzity hoření. Pokud je rychlost hoření malá, což se stává zejména ke konci měření při dohořívání vzorku, je do výpočtu zanášena numerická chyba, protože jak MLR, tak HRR jsou velmi malá a jejich dělením získáváme velmi malá čísla, jejichž přesnost je výrazně nižší.

Jestliže říkáme, že HRR lze spočítat ze znalosti MLR a efektivní výhřevnosti, je třeba mít na paměti, že předpokládáme, že je efektivní výhřevnost konstantní. Z výše uvedeného textu je ale zřejmé, že to platí pouze pro ustálené hoření. Efektivní výhřevnost, vypočtená z MLR a HRR, je ale v čase proměnná tak, jak se mění rychlost odhořívání. Průměrná hodnota efektivní výhřevnosti bude silně ovlivněna volbou časového intervalu hoření vzorku, který pro výpočet průměrné hodnoty zvolíme.

6.1.3 Teplo na zplynění pevné fáze, reakční teplo

	empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
Teplo na zplynění pevné fáze	NE	NE	ANO	NE
Reakční teplo	NE	ANO – není nutné	NE	ANO

Teplo na zplynění v sobě obsahuje i energii, kterou je třeba dodat na ohřátí látky na pyrolýzní teplotu a teplo na jakékoliv procesy, které pod pyrolýzní teplotou mohou probíhat, jako např. tání. Při přejímání hodnot z literatury je tedy velmi důležité rozlišovat teplo na zplynění a reakční teplo pro rozklad pevné látky. Reakční teplo ΔH_r v sobě zahrnuje pouze teplo potřebné na přeměnu z pevného skupenství na plynné při pyrolýzní teplotě. V angličtině je reakční teplo označováno několika pojmy – heat of vaporization, heat of volatilization, heat of pyrolysis, heat of reaction. Snadno také může docházet k záměně s reakčním teplem reakcí probíhajících v plynné fázi. Reakční teplo se v oblasti pyrolýzního modelování obvykle určuje z měření Diferenční kompenzační kalorimetrií (DSC) (Matala, 2013).

Teplo na zplynění nelze přímo změřit, lze ho odvodit z energetické bilance na povrchu pevné látky. Abychom mohli určit celkový dopadající tok na povrch pevné látky, musíme mít dobře definovány podmínky experimentu, ze kterého budeme teplo na zplynění určovat, abychom energetickou bilanci mohli provést. Při využití kónického kalorimetru je celkový tepelný tok dopadající na povrch pevné látky dán tepelným tokem zářiče \dot{q}_e , tepelným tokem z plamene \dot{q}_f a tepelnými ztrátami z povrchu \dot{q}_l .

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_e + \dot{q}_f - \dot{q}_l$$

Existují korelace, podle kterých lze odhadnout tepelný tok z plamene a tepelné ztráty z povrchu, musíme však znát další řadu parametrů, jako je podíl konvektivní a radiační složky tepelného toku z plamene, emisivitu plamene, emisivitu povrchu, teplotu povrchu a další. Jedná se tedy o poměrně složitou inženýrskou analýzu. Pro bližší rozbor je čtenář odkázán na odbornou literaturu (Kim & Dembsey, 2012).

6.1.4 Povrchová teplota při vzplanutí

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	ANO	ANO	ANO – pro nekonečně rychlou reakci a v případě, že uvažujeme že se rovná pyrolýzní teplotě

Teplota vzplanutí v jednoduchých pyrolýzních modelech slouží jako kritérium, podle kterého se posuzuje, zda a kdy v modelu dojde ke vzplanutí a hoření látky. Základním předpokladem využití tohoto konceptu je tedy to, že každá látka má pouze jednu teplotu vznícení.

Teplota vznícení má dvě možné definice. První je, že se jedná o teplotu povrchu pevné látky těsně před tím, než dojde ke vzplanutí a druhá definice odpovídá definici teploty vzplanutí dle ČSN 64

0149, tedy že se jedná o nejnižší teplotu vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu. V matematických modelech se jako teplota vzplanutí T_{ig} uvažuje právě povrchová teplota látky při vzplanutí. Metody měření, při kterých je měřena teplota plynu a ne pevné látky, jsou založeny na konvektivním ohřevu látky. Při požáru je ale dominantní složkou tepelného toku působícího na pevné látky sálání. Informace o teplotě plynu v peci, při které došlo ke vzplanutí látky má opodstatnění pouze pro specifické aplikace. Z tohoto důvodu jsou do modelů požáru preferována měření, která jako teplotu vzplanutí definují povrchovou teplotu látky a ne plynu.

Přesná měření teploty povrchu jsou náročná na instrumentaci a přesnost měření. Vyžadují termočlánky velmi malých průměrů s rychlou odezvou a je třeba zajistit správný kontakt termočlánku se vzorkem. Druhou možností je využití bezkontaktního měření teploty. To je velmi často obtížně proveditelné jak fyzicky, protože je komplikované zajistit v laboratorním testu správné umístění měřidla vzhledem k poloze vzorku, ale také z hlediska odečítání hodnot respektive nastavení termokamery či bezdotykového teploměru. Podle povahy vzorku se část dopadajícího tepelného toku může od povrchu látky odrážet. Druhým problémem je to, že vznikající plyny, které jsou v prostoru mezi povrchem vzorku a senzorem, silně pohlcují teplo. V případě, že vzorek hoří, zanášá se do problému ještě vliv radiace z plamene. Pro správné určení povrchové teploty musí všechny tyto faktory být ve výpočtu zahrnuty.

Druhou možností je teplotu vzplanutí neměřit přímo, ale počítat na základě korelací dat času do vzplanutí jako funkce tepelného toku dopadajícího na povrch pevné látky. Jako u všech parametrů, které jsou počítány a ne přímo měřeny, získané hodnoty závisí na použitém výpočetním vztahu. Analytické výpočetní vztahy jsou odvozeny z teoretického popisu problému, v tomto případě energetické bilance na povrchu vzorku a získané teploty vzplanutí se tak pro různé metody mohou lišit. Je třeba být si vědom předpokladů, které v sobě jednotlivé metody pro výpočet teploty vzplanutí obsahují a zda odpovídají laboratornímu měření, ze kterého analýzu provádíme a zda je provádíme za správných podmínek. Příkladem může být např. to, že v analýzách času do vznícení v závislosti na tepelném toku uvažujeme, že na povrchu látky nedochází před vzplanutím k žádným rozkladným reakcím a nevzniká zuhelnatělý zbytek. Tento předpoklad platí z termoplastických polymerů pro vyšší hodnoty tepelného toku než je přibližně 25 kW/m^2 (Kim & Dembsey, 2012). Při nižších hodnotách tepelného toku bylo prokázáno, že už tento předpoklad nelze použít, respektive nelze tyto procesy zanedbat a odvozená teplota vzplanutí je výrazně vyšší.

Existuje celá řada metod, jak určit teplotu povrchu při vzplanutí, velká část z nich je zakotvena v amerických či evropských normách a využívá laboratorních přístrojů pro měření PTCH jako je např. kónický kalorimetr. Problematika teploty vzplanutí a způsobů jejího měření je velmi podrobně popsána v (Babrauskas, 1992).

Další teplotou, o které se v souvislosti s modelováním pyrolýzy mluví, je pyrolýzní teplota T_p . Působením tepelného toku na materiál roste jeho teplota až při dosažení pyrolýzní teploty se začnou uvolňovat z pevné látky hořlavé plyny. Tyto plyny se mísí v plynné fázi v blízkosti povrchu vzorku difúzí i konvekcí se vzduchem až dojde ke vzniku hořlavé směsi. Pokud je množství tepla uvolněné při hoření této směsi dostačující, aby překonalo ztráty tepla odvodem do pevné fáze, bude látka trvale hořet plamenem a její povrchová teplota bude dosahovat teploty vzplanutí.

V mnoha případech lze čas na promíchání plynů a ohřev hořlavé směsi zanedbat. Pyrolýzní teplota se poté ztotožňuje s povrchovou teplotou pro vzplanutí (Torero & Rein, 2010).

6.2 Tepelně technické charakteristiky látek (TTCH)

Hustota, součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita jsou vlastnosti pevné látky, které společně ovlivňují, jak látka vede a akumuluje teplo. Ovlivňují to, jak rychle se látka ohřívá směrem od povrchu skrz průřez materiálu, pakliže na ní působí tepelný tok. Všechny pyrolýzní modely, které stanovují dobu do vzplanutí, tyto tři hodnoty vyžadují jako základní vstupní údaj, který přímo ovlivňuje, jak rychle bude dosaženo teploty pro vzplanutí na povrchy látky nebo pyrolýzní teploty, a tím přímo ovlivňují předpovídanou rychlost tepelného rozkladu a polohu pyrolýzní fronty.

Je třeba si uvědomit, že tepelně technické charakteristiky obecně nejsou pro velkou část látek konstanty, ale jsou funkcí teploty. Proces sdílení tepla v pevné fázi se tak bude s časem měnit, jak se s rostoucí teplotou mění tepelně technické charakteristiky látky. Po dosažení pyrolýzní teploty se začíná látka rozkládat. Nad teplotou rozkladu v sobě zahrnuje i strukturní a chemickou změnu materiálu. V modelech pyrolýzy lze závislost TTCH obvykle jednoduše zahrnout předpisem, který stanoví TTCH za dané teploty a mezi těmito body ji proloží různou funkční závislostí od lineární po polynomy vyššího stupně atd.

6.2.1 Hustota a objemová hmotnost

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	ANO	ANO	ANO

Hustota, respektive objemová hmotnost, látek je jednou z nejčastěji měřených veličin pro charakterizaci pevných látek. Hustota vyjadřuje, jakou hmotnost má jednotkový objem látky. Nejjednodušším způsobem, jak vypočítat hustotu, je zvážit vzorek o známém objemu. V případě, že látka neobsahuje žádné póry, takto získanou hodnotu opravdu můžeme označit jako hustotu látky. Pokud se jedná o látku, která v sobě obsahuje póry, nevztahujeme hmotnost látky na její jednotkový objem, ale na objem zvětšený o objem pórů. Správně bychom pak měli takto získanou hodnotu označit jako objemovou hmotnost (bulk density). Postupy pro měření hustoty jsou dobře popsány a stanoveny v literatuře, v praxi se v oblasti modelování požáru pracuje spíše s objemovou hmotností převážně proto, že lze tuto hodnotu snadno určit. Pokud je vzorek silně porézní, je třeba toto zahrnout už v úvahách při výběru komplexity použitého pyrolýzního modelu, protože porozita vzorku bude silně ovlivňovat jeho chování při tepelném rozkladu a hoření.

Hustota se v modelech požáru uvažuje téměř vždy konstantní, ačkoliv obecně s rostoucí teplotou u polymerů, dřeva a aglomerovaných dřevných materiálů s rostoucí teplotou klesá.

6.2.2 Součinitel tepelné vodivosti

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	ANO	ANO	ANO

Součinitel tepelné vodivosti vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Čím vyšší hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím lépe materiál vede teplo.

Existují dvě principiálně rozdílné možnosti měření součinitele tepelné vodivosti a to buď za ustálených, nebo neustálených podmínek měření. Měření za ustálených podmínek funguje na principu, že vzorek je umístěn mezi dvě desky, z nichž jedna je chlazená a druhá vyhřívána a je měřen teplotní gradient a intenzita toku tepla mezi deskami. Součinitel tepelné vodivosti je počítán z Fourierova zákona upraveného pro vedení tepla pouze v jednom směru. Ustálené metody měření se liší podle toho, zda tepelný tok materiálem je měřen přímo, nebo využívají pro stanovení tepelného toku referenční vzorek o známé hodnotě součinitele tepelné vodivosti. Metody, které vyžadují pro stanovení součinitele tepelné vodivosti ustálený tepelný tok, jsou časově náročné. Metody využívají relativně velké vzorky (desítky cm) a většinou neumožňují stanovovat součinitel tepelné vodivosti při vyšších teplotách. Metody, které měří tepelný tok za neustálených podmínek, nejsou tak přesné, nicméně jsou podstatně rychlejší, často umí pracovat s malými vzorky, mají snadnější instrumentaci měření a některé dokáží stanovovat součinitel tepelné vodivosti za zvýšené teploty.

Na trhu je nabízena široká škála přístrojů na stanovení součinitele tepelné vodivosti. Výběr vhodné metody závisí na tom, jaké materiály chceme stanovovat a za jakých teplot. Součinitel tepelné vodivosti se velmi často stanovuje např. pro izolační materiály. U izolačních materiálů je žádoucí, aby jejich tepelná vodivost byla nízká, a není třeba ji znát za zvýšených teplot. Tomu odpovídají také nabízené měřicí přístroje. Naopak v oblasti pyrolýzního modelování můžeme očekávat velmi širokou škálu materiálů různých tvarů a složení a tedy i hodnot součinitele tepelné vodivosti a zajímá nás i jeho závislost na teplotě v rozsahu od okolní teploty do teploty, při které začne docházet k tepelnému rozkladu látky.

6.2.3 Měrná tepelná kapacita

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	ANO	ANO	ANO

Měrná tepelná kapacita vyjadřuje, kolik tepla je třeba dodat materiálu, aby se jeho jednotkové množství ohřálo o jeden Kelvin.

Běžně využívaná metoda pro stanovení měrné tepelné kapacity je diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC). V rámci metody je vzorek a referenční materiál zahříván konstantní rychlostí a je měřeno teplo, které je vzorku třeba dodat. Toto teplo je úměrné měrné specifické kapacitě látky. Je třeba znát hmotnost látky. Pakliže dochází k rozkladu látky, tedy změně hmotnosti, je třeba měrnou specifickou kapacitu přepočítat. Při ohřevu látky dochází často k fázové přeměně nebo jiným reakcím, při kterých sice nedochází ke změně hmotnosti, ale spotřebovává se přitom teplo. V takovém případě pak měrná tepelná kapacita nezahrnuje pouze teplo potřebné na ohřev

látky, ale i teplo spotřebované reakcí nebo fázovou přeměnou. Hovoříme pak o tzv. zdánlivé měrné tepelné kapacitě. Proces vyhodnocení měrné tepelné kapacity z DSC měření je třeba vztahovat k zamýšlené aplikaci. Většina dat v literatuře udává měrnou tepelnou kapacitu látek za pokojové teploty. V pyrolýzním modelování nás zajímá také hodnota za zvýšené teploty. Vzhledem k faktorům, které byly popsány výše, pak za zvýšených teplot pracujeme spíše se zdánlivou měrnou tepelnou kapacitou. Stanovení měrné tepelné kapacity při dané teplotě je třeba brát s ohledem na zamýšlenou aplikaci získaných hodnot, případně ji vztáhnout ke stanovenému reakčnímu schématu komplexního pyrolýzního modelu.

6.2.4 Tepelná setrvačnost

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	NE	ANO	NE

Tepelná setrvačnost vyjadřuje míru, jak rychle se ohřeje povrch látky, pakliže je vystavena tepelnému toku. Materiály s nízkou tepelnou setrvačností vzplanou dříve než materiály s vyšší tepelnou setrvačností, jestli uvažujeme, že na oba působíme stejným tepelným tokem a oba mají stejnou teplotu povrchu při vzplanutí. U analytických pyrolýzních modelů je tepelná setrvačnost látky spolu s teplotou vzplanutí vstupním parametrem modelu určující podmínky pro vzplanutí látky v modelu.

Tepelnou setrvačnost lze spočítat z definice jako součin hustoty, součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity. Získat tyto tři hodnoty měřením je ovšem časově náročné. Druhým problémem je závislost měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti na teplotě. Často se tepelná setrvačnost stanovuje, obdobně jako teplota povrchu při vzplanutí, na základě korelací dat času do vzplanutí jako funkce tepelného toku dopadajícího na povrch pevné látky. Je třeba si ale uvědomit, že takto získaná hodnota závisí na modelových předpokladech, které jsme při jejím odvození použili.

6.3 Ostatní

Koeficient přestupu tepla z pevné fáze do plynné a emisivita jsou dva parametry, které vystupují v energetické bilanci na povrchu pevné látky. Je třeba je stanovit v mnoha analýzách experimentálních dat, kde je třeba definovat tepelný tok působící na povrch pevné látky. Koeficient přestupu tepla vystupuje ve členu tepelného toku konvekcí, emisivita ve členu tepelného toku sáláním.

6.3.1 Koeficient přestupu tepla

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	NE	ANO	NE

Konvektivní složka toku tepla \dot{q}_c působícího na povrch je funkcí rozdílu teploty povrchu T_s a okolní teploty T_∞ . Konstantou úměrnosti je právě koeficient přestupu tepla h_c .

$$\dot{q}_c = h_c(T_s - T_\infty)$$

Uvažujeme-li, že tok dopadající na povrch látky odpovídá kritickému toku pro vzplanutí, teplota povrchu je pak rovna teplotě povrchu při vzplanutí a je ji možno takto odvodit z experimentálních dat. Hodnota koeficientu přestupu tepla závisí na typu laboratorní zkoušky a orientaci vzorku. Literaturou doporučená hodnota koeficientu přestupu tepla pro experimenty v kónickém kalorimetru se vzorkem v horizontální poloze je 0,012 kW/m²/K, pro vzorky ve vertikální poloze 0,016 kW/m²/K (Kim & Dembsey, 2012).

6.3.2 Emisivita povrchu

empirické modely	semi-empirické modely	analytické modely	komplexní modely
NE	ANO	ANO	ANO

Emisivita je vlastnost povrchu, která vyjadřuje, jak účinně povrch vyzařuje tepelnou energii ve srovnání s ideálním černým tělesem. Emisivita je obecně funkcí vlnové délky, směru a teploty. Závislost emisivity na směru a vlnové délce se velmi často zanedbává. Emisivita je pak funkcí struktury (úpravy) povrchu a teploty. Emisivita nabývá hodnot mezi nulou a jedničkou. Velmi často se jako zjednodušení uvažuje, že emisivita povrchu dané látky je rovná nebo blízká jedné. Látka se pak chová jako černé těleso, tedy pohlcuje všechno dopadající tepelné záření. Tato aproximace platí pro velkou část materiálů, které mají tmavý matný povrch. Pro lesklé povrchy je emisivita výrazně nižší než jedna.

Emisivita se měří na základě dvou rozdílných principů: buď měřením tepelného toku vyzářeného z povrchu vzorku a povrchu černého tělesa, pakliže je ozáříme infračerveným zdrojem, nebo metodami kalorimetrickými, při kterých je emisivita vypočítána na základě energetické bilance mezi vzorkem a černým tělesem, které je vzorkem ozářeno. Jedná se obecně o metody měření, které jsou značně pokročilé a nejsou běžně stanovovány v požárně-technických laboratořích. Emisivita velkého množství materiálu lze dohledat v literatuře.

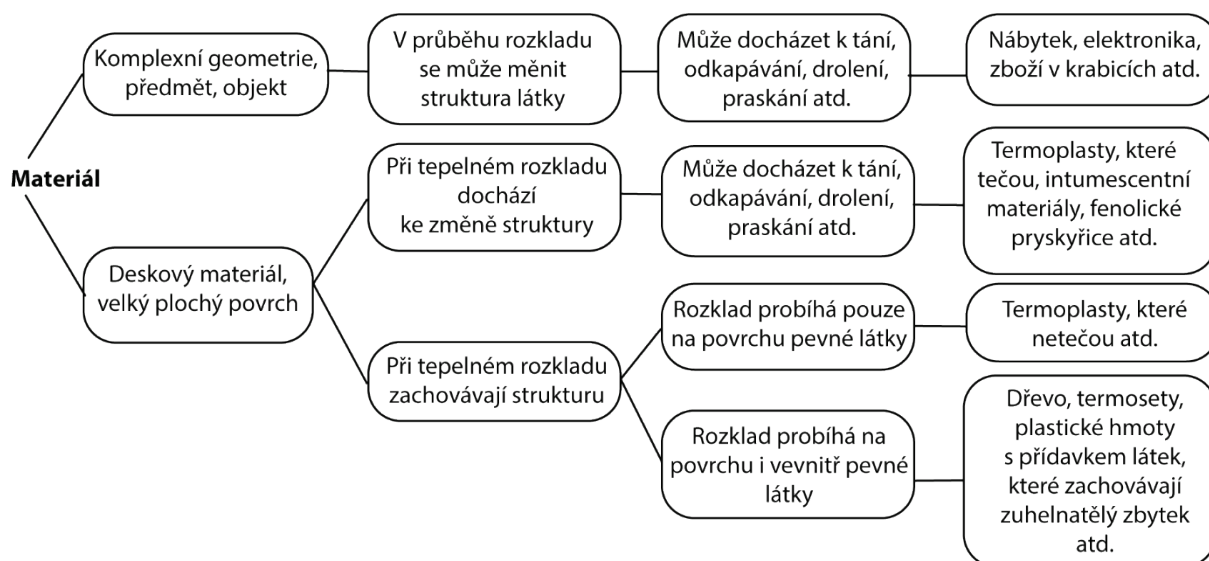
7 Jak vybrat pyrolýzní model?

Volba zdroje hoření – pyrolýzního modelu – má mnoho hledisek a neexistuje jednotný návod. Primárně je řízena kompromisem mezi očekávaným výstupem a možnostmi modelu, charakterem hořlavého materiálu a dostupností vstupních dat.

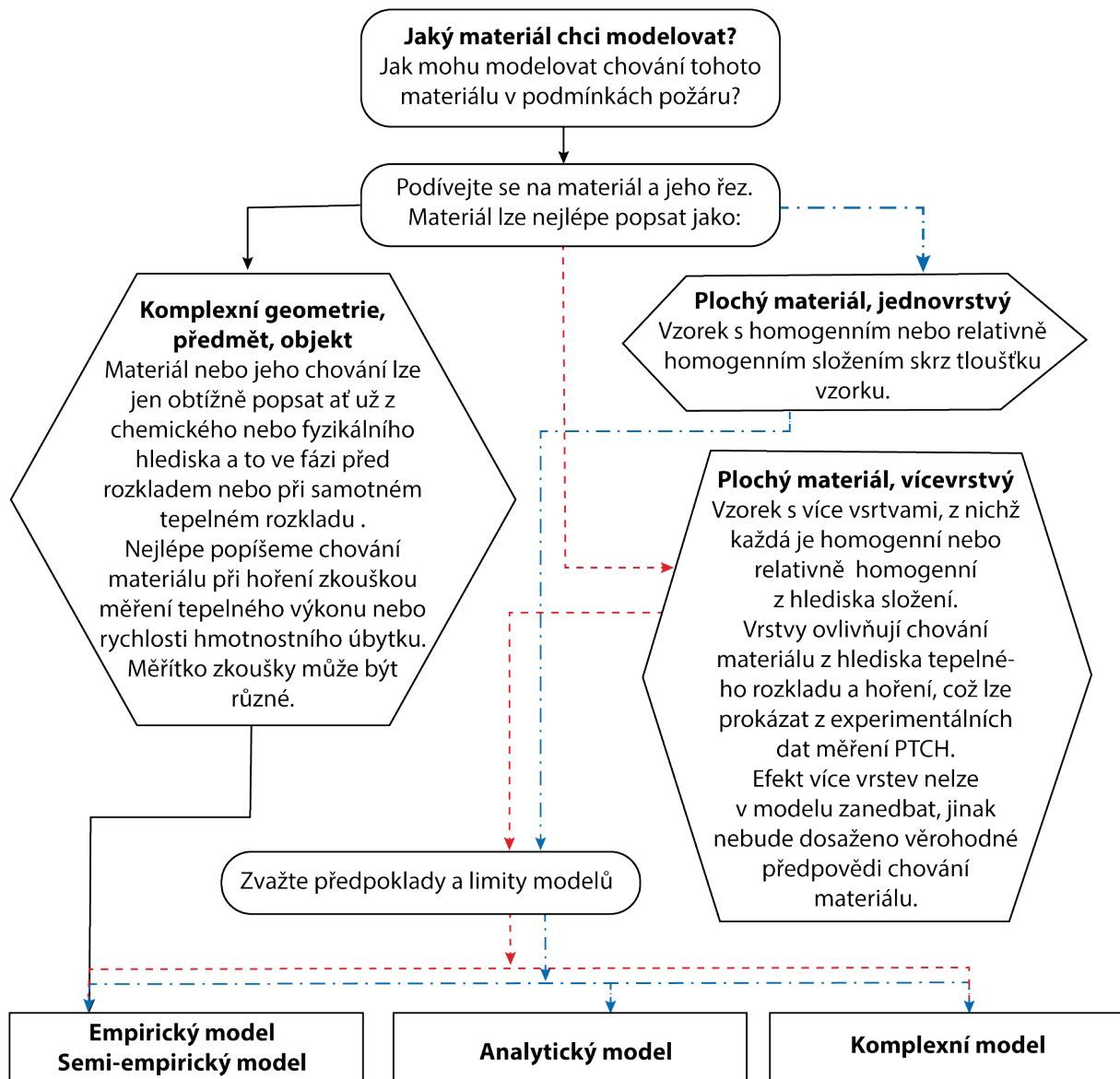
Jaký je očekávaný výstup modelu? Vždy volíme co nejjednodušší model, který dokáže popsat to, co potřebujeme. Z tohoto důvodu je nutné, aby byl jasně definován požární scénář a kritéria přijatelnosti, podle kterých budeme rozhodovat, zda je navržené a posuzované řešení vhodné či ne. Zdroj hoření (pyrolýzní model) musí být volen v souladu s tím.

Jaké jsou aplikační možnosti modelů/softwareů? Jinými slovy dokáže model popsat to, co potřebuji? A pokud ano, jak přesné jsou jeho výsledky? Aplikační možnosti konkrétního modelu

požáru jsou dány úrovní implementovaných modelů probíhajících procesů a musí být definovány vývojáři modelu v technické či uživatelské dokumentaci. V oblasti modelů požáru se rozlišuje tzv. verifikace a validace. Procesem verifikace se rozumí kontrola správnosti numerické implementace modelových představ, hovorově „kontrola matematiky“. K tomu se obvykle využívá jednodušších úloh, u kterých známe analytické řešení a můžeme s ním výstup modelu porovnat. Procesem validace se rozumí shoda výstupů modelu v porovnání s experimentálními daty, hovorově „kontrola fyziky“. Některé modely požáru včetně velmi často užívaného softwaru FDS mají validační manuál, kde uvádějí, pro jaké konkrétní úlohy byl jejich software validován, pro jaké konkrétní podmínky a s jakou přesností lze očekávat v dané oblasti zájmu (např. simulace teploty podstropní vrstvy plynů) výstupy modely.



Obr. 3: Členění materiálu z hlediska jejich chování při tepelném rozkladu.



Obr. 4: Volba komplexity pyrolyzního modelu v závislosti na typu materiálu.

Lze získat relevantní vstupní data v rámci dané komplexity modelu? Volba modelu úzce souvisí s materiálem, jehož hoření budeme simulovat. Na schématech na obrázcích Obr. 3 a Obr. 4, která jsou převzata z (Kim & Dembsey, 2012) je ilustrováno, jakým způsobem nahlížet na materiál, který chceme modelovat a jaký pro daný typ materiálu zvolit model. Jak je vidět na schématu 4, jednoznačná volba komplexity modelu je možná jen pro složité objekty a komplexní objekty, jejichž chování je nejvýhodnější nebo jako jediné možné popsat experimenty měření jejich tepelného výkonu. Pro všechny ostatní materiály je třeba komplexitu zvolit s ohledem na předpoklady a limity modelů. Ačkoliv materiál teoreticky spadá do skupiny materiálů, které z jejich podstaty lze modelovat komplexně, je možné, že bude nakonec zvolen model empirický. Důvodem může být například to, že nelze dostatečně spolehlivě určit potřebná vstupní data, nebo by komplexní model vedl na modelovou situaci, která je vzhledem k požadovaným výstupům modelu zbytečně komplikovaná a zanáší do výstupu modelu více nejistot.

8 Závěr

Za správnost vstupních údajů a interpretaci výstupů matematického modelu nese vždy odpovědnost zpracovatel modelu. Vzhledem k vysoké míře variability požárních scénářů je vždy nutné okomentovat a zdůvodnit následující body:

- 1) Jaký byl zvolen zdroj hoření?
- 2) Jak byl tento zdroj reprezentován v matematickém modelu? Je třeba jasně stanovit, který přístup k modelování zdroje byl zvolen.
- 3) Jaké jsou voleny předpoklady a omezující limity modelu a jak ovlivní interpretaci výsledků modelu?
- 4) Jak jsou definované požadované vstupní parametry modelu?
- 5) Jak byly získány a jak relevantní jsou vstupní hodnoty do modelu?

Bez těchto informací nelze posoudit, zda výstupy modelu a interpretace výstupů modelů, která musí být nedílnou součástí dokumentace, lze považovat za vypovídající.

Reference

- Babrauskas, V. (1992). *Ignition Handbook*. USA: Fire Science Publishers.
- Dvořák, O. (2016). Požární charakteristiky pro pokročilé modelování požárů. *TZB info*.
- Filipi, B. (2003). *Nauka o materiálu*. Ostrava: SPBI.
- Hurley, M. J. (2015). *Performance-Based Fire Safety Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Hurley, M. J., & Rosenbaum, E. R. (2015). *Performance-Based Fire Safety Design*. CRC Press.
- Kim, M. E., & Dembsey, N. (2012). *Engineering Guide for Estimating Material Pyrolysis Properties for Fire Modeling*. Worcester Polytechnic Institute.
- Lautenberger, C. (2007). A generalized pyrolysis model for combustible solids. Berkley: Ph.D. thesis, University of California.
- Lautenberger, C., & Fernandez-Pello, C. (2008). Pyrolysis modeling, thermal decomposition and transport processes in combustible solids. V *Transport Phenomena in Fires* (stránky 210-259). Boston: WIT Press.
- Matala, A. (2013). *Methods and applications of pyrolysis modelling for polymeric materials*. Aalto University School of Science: VTT Finland.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., & Vanella, M. (2019). *Fire Dynamics Simulator User's Guide* (6th ed.). NIST special publication 1019: National Institute of Standards and Technology.
- Torero, J. L., & Rein, G. (2010). Physical Parameters Affecting Fire Growth. V A. B. Ch. A. Wilkie (Editor), *Fire Retardancy of Polymeric Materials 2nd edition*. USA: CRC Press.

Seznam obrázků

Obr. 1: Fyzikální a chemické procesy probíhající v pevné a plynné fázi při tepelném rozkladu a hoření.....	6
Obr. 2: Vazba mezi vstupy do modelu požáru a jejich komplexitou.....	11
Obr. 3: Členění materiálu z hlediska jejich chování při tepelném rozkladu.....	27
Obr. 4: Volba komplexity pyrolýzního modelu v závislosti na typu materiálu.....	28

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vstupní data do empirických modelů.....	13
Tabulka 2: Vstupní data do semi-empirických modelů.....	14
Tabulka 3: Vstupní data do analytických modelů.....	15
Tabulka 4: Vstupní data do komplexních pyrolýzních modelů.....	17

Přílohy

A. Další doporučené zdroje

Metodické návody pro využití pokročilých matematických modelů v oblasti požární bezpečnosti staveb.

- Verification Method C/VM2, Framework for Fire Safety Design, New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire.
- BS 7974:2019 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice.
- SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection. Society of Fire protection Engineers
- ISO/TS 13447:2013 - Fire safety engineering -- Guidance for use of fire zone models
- ISO/TS 16733 Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires
- INSTA 950 Fire Safety Engineering – Comparative method to verify fire safety design in buildings

Databáze a zdroje dat do pokročilých matematických modelů hoření.

- Burning Item database, Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland
<http://www.firebid.umd.edu/index.php>
- <http://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=people&id=46&sub=383>

B. Pro posuzovatele

Zdroj hoření je definován jako?

- A. Křivka tepelného výkonu jako funkce času (případně křivka rychlostního úbytku látky jako funkce času) → empirický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
- B. Křivka tepelného výkonu jako funkce času (případně křivka rychlostního úbytku látky jako funkce času) a tepelně technické charakteristiky látek → semi-empirický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
- C. V zadání zdroje hoření vystupuje schéma tepelného rozkladu látek, reakční parametry rozkladu a materiálové vlastnosti látek → komplexní model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
 - ii. Prokažte validaci vstupních dat do modelu.
- D. V zadání zdroje hoření vystupují tepelně technické charakteristiky látek a teplo pro zplynění → analytický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.

Křivka tepelného výkonu jako funkce času je?

- A. Pouze jedna
 - V modelu uvažujeme, že hoří pouze jeden objekt/předmět (lokální požár).
 - i. Zdůvodněte hodnoty a průběh tepelného výkonu.
 - Jednou křivkou reprezentujeme hoření všech předmětů a materiálů na základě znalosti požárního zatížení.
 - i. Zdůvodněte hodnoty a průběh tepelného výkonu.
- B. Křivka tepelného výkonu je jedna, ale je složena z křivek pro více materiálů nebo objektů.
 - Křivka zahrnuje šíření hoření mezi materiály/objekty. Z hlediska modelu je ale zadávána jako lokální požár.
 - i. Jak byly stanoveny jednotlivé výkonové křivky?
 - ii. Jak byl stanoven čas do vzplanutí ostatních objektů od primárního zdroje?
 - iii. Jaký materiál a proč byl zvolen jako primární zdroj? –viz požární scénář.
- C. Každý materiál/objekt má vlastní křivku tepelného výkonu → model bude napodobovat šíření hoření mezi jednotlivými objekty (šířící se požár).
 - Jak je stanoveno kritérium pro vzplanutí okolních objektů?
 - i. Definujte kritérium pro vzplanutí. Zdůvodněte zvolené hodnoty (měření, literatura, inženýrská aproximace na základě dat z literatury a/nebo měření).
 - ii. Doložte/odůvodněte vstoupené tepelně technické charakteristiky látek, pokud je kritériem pro vzplanutí teplota vzplanutí.
 - iii. Doložte/odůvodněte nastavení řešič plyné fáze s důrazem na sdílení tepla sáláním, pokud je kritériem pro vzplanutí dopadající tepelný tok.

Jaké fáze popisuje křivka tepelného výkonu?

- A. Křivka reprezentuje fázi rozvoje, plně rozvinutý požár i dohořívání.
 - i. Jak byla určena délka trvání každé fáze a maximální tepelný výkon?
- B. Křivka reprezentuje primárně plně rozvinutý požár.
 - i. Je toto rozhodnutí v souladu s požadovanými výstupy/aplikací modelu?
 - ii. Lze na základě tohoto předpokladu posoudit splnění kritérií přijatelnosti?
 - iii. Jak byla určena hodnota tepelného výkonu a čas trvání?
- C. Křivka reprezentuje primárně fázi rozvoje.
 - i. Je toto rozhodnutí v souladu s požadovanými výstupy/aplikací modelu?
 - ii. Lze na základě tohoto předpokladu posoudit splnění kritérií přijatelnosti?
 - iii. Jak byla určena rychlost rozvoje požáru?
 - iv. Při použití empirických vztahů typu „kvadratický požár“
 - i. Byla křivka odvozena na základě požadované doby rozvoje nebo maximálního dosaženého tepelného výkonu? Proč?
 - ii. Byla adekvátně zvolena hodnota konstanty charakterizující rychlost rozvoje požáru v kontextu typu materiálu a požárního scénáře?

Jak je tepelný výkon vztažen na plochu pro zadání křivky tepelného výkonu do modelu (HRRPUA)?

- A. Data jsou převzata z velkorozměrového experimentu.
 - i. Jak velká je plocha zdroje hoření v modelu v porovnání s experimentem?
 - ii. Pohybuje se vypočtená hodnota tepelného výkonu vztažená na plochu v reálných mezích?
 - iii. Bude s plochou zdroje hoření v modelu a HRRPUA dosaženo tepelného výkonu dle požadované křivky? (neuvažujeme omezení tepelného výkonu vlivem ventilačních podmínek).
- B. Data jsou převzata z laboratorních měření typu kónický kalorimetru – tepelný výkon je již vztažen na plochu.
 - i. Pohybuje se hodnota tepelného výkonu vztažená na plochu v reálných mezích?
 - ii. Jak velká je plocha zdroje hoření v modelu.
 - iii. Bude s plochou zdroje hoření v modelu a HRRPUA dosaženo tepelného výkonu dle požadované křivky? (neuvažujeme omezení tepelného výkonu vlivem ventilačních podmínek).
- C. Křivka tepelného výkonu je sestavena z empirických korelací nebo inženýrskou aproximací z literárních dat.
 - i. Pohybuje se hodnota tepelného výkonu vztažená na plochu v reálných mezích?
 - ii. Jak velká je plocha zdroje hoření v modelu?

- iii. Bude s takto velkou plochou a HRRPUA dosaženo požadovaného tepelného výkonu dle křivky?

Je křivka tepelného výkonu upravena na základě předpokladu aktivace sprinklerů?

- A. Po aktivaci sprinklerů zůstává tepelný výkon konstantní → model předpokládá, že po spuštění sprinklerů dojde k lokalizaci požáru.
 - i. Jak byl stanoven čas, kdy dojde k aktivaci sprinklerů?
- B. Po aktivaci sprinklerů tepelný výkon klesá → model předpokládá, že dochází k hašení požáru.
 - Snížení tepelného výkonu je zadáno přímo uživatelem v rámci křivky tepelného výkonu.
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář ospravedlnitelný?
 - ii. Jak byla stanovena rychlost poklesu tepelného výkonu?
 - Rychlost poklesu tepelného výkonu je simulována softwarem na základě tzv. extinkčního koeficientu (lze chápat jako koeficient „tlumení“).
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář ospravedlnitelný?
 - ii. Doložte a vysvětlete, jak byla stanovena hodnota extinkčního koeficientu. Jedná se o empirickou konstantu, nejedná se o fyzikální veličinu.

Jak je definována spalná reakce v plynné fázi?

- A. V modelu hoří jen jedna pevná látka.
 - i. Jaké je složení hořlavého plynu a jaké vznikají produkty?
 - ii. Jsou uvedeny podíly vznikajících sazí a CO?
 - iii. Vznikají reakcí jiné toxické plyny než CO? Doložte a vysvětlete definici spalné reakce a implementaci do modelu hoření.
- B. V modelu hoří více pevných látek.
 - Každá pevná látka je reprezentována jiným hořlavým plynem.
 - i. Jaké je složení každého hořlavého plynu a jaké vznikají produkty?
 - ii. Jsou uvedeny podíly vznikajících sazí a CO?
 - iii. Vznikají reakcí jiné toxické plyny než CO? Doložte a vysvětlete definici spalné reakce a implementaci do modelu hoření.
 - Všechny pevné látky jsou reprezentovány jedním hořlavým plynem.
 - i. Jaké je složení hořlavého plynu a jaké vznikají produkty?
 - ii. Jsou uvedeny podíly vznikajících sazí a CO?
 - iii. Vznikají reakcí jiné toxické plyny než CO? Doložte a vysvětlete definici spalné reakce a implementaci do modelu hoření.
 - iv. Mají všechny pevné hořlavé materiály stanovenou efektivní výhřevnost?

