	Specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství Kód projektu VG20122014074	
Příloha č. **8.1**	**DYNAMIKA POŽÁRU**	
Datum vydání/aktualizace: **05. 01. 2014/08. 06. 2014**	Počet stran: **40**	Zpracovatel: **P. Kučera, J. Pokorný**

Obsah

Úvod 3

1 Fáze požáru 4

1.1 Počáteční fáze 4

1.2 Fáze rozvoje 5

1.3 Plně rozvinutá fáze 6

2 Rychlost uvolňování tepla 6

2.1 Stanovení rychlosti uvolňování tepla 7

2.2 Rychlost uvolňování tepla hořlavých kapalin 7

2.3 Stanovení rychlosti uvolňování tepla na základě provedených zkoušek 8

2.4 t-kvadratický požár 9

2.5 Požáry řízené odvětráním 12

2.6 Konvektivní podíl HRR 12

3 Lokální požár 12

3.1 Virtuální zdroj hoření 14

3.2 Geometrie sloupce kouřových plynů (Fire Plume) 15

3.3 Rychlost proudění sloupce kouřových plynů (Fire Plume) 16

3.4 Teplota sloupce kouřových plynů (Fire Plume) 18

3.5 Hmotnostní analýza sloupce kouřových plynů (Fire Plume) 19

3.6 Omezení platnosti modelu lokálního požáru 21

4 Podstropní proudění .....
4.1 Určení maximální teploty a rychlosti podstropního proudění 22
4.2 Charakteristická šířka vrstvy podstropního proudění 23
4.3 Působení konvekce podstropního proudění v blízkosti stropu 24
4.4 Plameny zasahující strop 25
5 Vrstva kouře 27
5.1 Popis vzniku vrstvy kouře 27
5.2 Zásady postupů pro stanovení vrstvy kouře 28
6 Celkového vzplanutí 29
6.1 Požáry řízené odvětráním 30
6.2 Stanovení rychlosti uvolňování tepla návrhových požárů dle Eurokódu 31
7 Teplotní křivky 33
7.1 Nominální teplotní křivky 33
7.2 Parametrické teplotní křivky 34
Použitá literatura 40

Úvod

Dynamika požáru je široká oblast, která v sobě zahrnuje především zhodnocení vzniku a rozvoje požáru, tvorbu a šíření kouře a vytváření toxických látek. Během několika desítek let bylo o této problematice napsáno mnoho odborných článků a knih, a vznikla tak řada teoretických postupů, jak výše uvedené jevy matematicky posuzovat. Zároveň se rozvíjely experimentální techniky, které přispívaly k využití veškerých údajů o požáru, ať již teoretických nebo experimentálních, jako vstupních dat pro výpočtové metody anebo pro provádění zkoušek ve skutečném měřítku při posouzení platnosti a mezí požárních modelů.

V praxi se popisuje (klasifikuje) chování jednotlivých hořlavých materiálů požárními charakteristikami jako je zapalitelnost, intenzita hoření, tvorba kouře a toxických látek aj. Zároveň je snahou zamezit vzniku požáru například preventivními opatřeními nebo kontrolou množství a způsobu umístění hořlavých materiálů. Avšak nikdy není možné zcela zabránit vzniku požáru, proto je třeba se zabývat vhodným stanovením požárně technických charakteristik hořlavých materiálů.

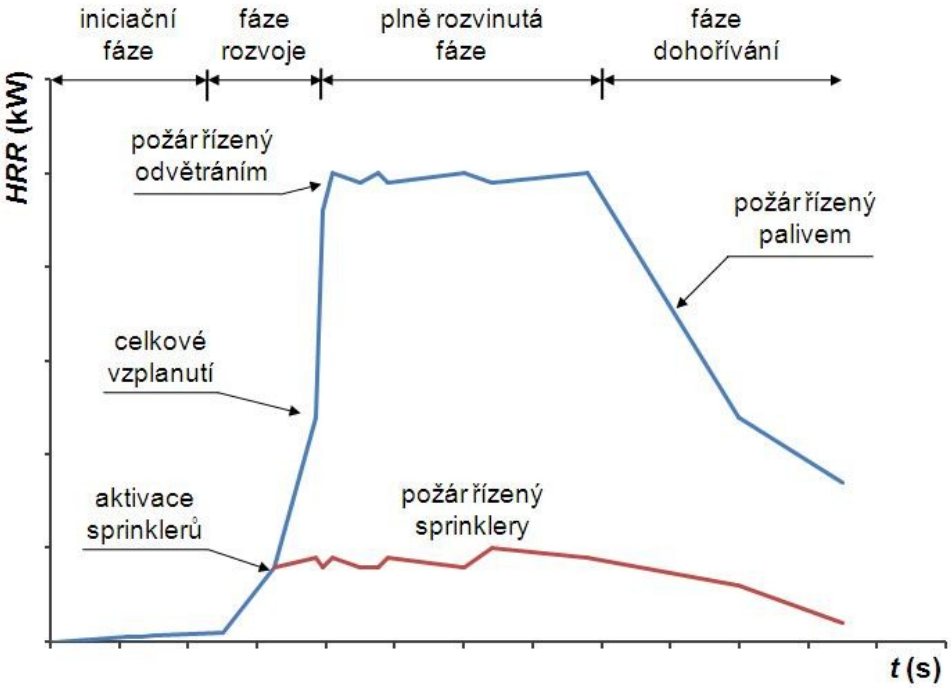
Požárně technické vlastnosti použitých materiálů jsou do značné míry získané empiricky a jsou založené na chování produktu při specifické zkoušce ve zmenšeném měřítku dle zkušebních předpisů. Novodobý přístup si však vyžaduje vytvoření klasifikačního schématu, založeného na zkouškách ve zmenšeném měřítku. Toto schéma by mělo více odpovídat předpokládanému chování požáru při jednom nebo při více požárních scénářích v měřítku skutečném. Jestliže tyto scénáře dostatečně reprezentují skutečné požární scénáře, je tento klasifikační systém spolehlivější než ty, které jsou založeny pouze na zkouškách ve zmenšeném měřítku.

Dynamiku požáru lze charakterizovat pro v podmínkách vnitřního a vnějšího prostředí. Pro potřeby tohoto učebního textu je obsah zaměřen na popis *průběhu požáru v uzavřeném prostoru* (uvnitř stavebních objektů).

Počátek rozvoje takového požáru se nejčastěji vztahuje k idealizovanému bodovému zdroji hoření umístěného na podlaze místnosti, který je charakterizován rychlostí uvolňované energie a vývinem produktů hoření. Rychlost proudění plynných zplodin hoření je časově proměnná a roste díky rostoucímu rozdílu teploty a hustoty mezi produkty spalování a vnějším okolí, a tím vzniká vztlakový efekt. Dosáhne-li sloupec plynných zplodin hoření stropu, formuje se podstropní horká vrstva plynů, která postupně vyplňuje podstropní prostor. Vytvoří se tak znatelné rozhraní mezi horkou vrstvou ohřívanou vzestupným proudem spalin z místa požáru a dolní vrstvou ochlazovanou přívodem studeného vzduchu z vnější strany objektu přes otvory. Klesne-li horká vrstva na úroveň otvorů (oken či dveří) umístěných ve stěnách místnosti, pak horké plyny odcházejí skrz tyto otvory ven a dochází tak k výměně plynů o různých teplotách a různém tlakovém rozdělení.

1 Fáze požáru

Průběh idealizovaného požáru v uzavřeném prostoru je možné rozdělit do čtyř základních fází znázorněných na následujícím grafu:



Obr. 1 – Fáze požáru v uzavřeném prostoru [1]

1.1 Počáteční fáze

Počáteční (iniciační, inkubační) fáze je doba, za kterou hořlavý materiál akumuluje kritické množství energie dostatečné k tomu, aby se uvolnilo takové množství hořlavých produktů pyrolýzy, které stačí k tomu, aby došlo k jeho dalšímu hoření nebo žhnutí. Iniciace procesu hoření závisí na koncentraci paliva a vzduchu a na vlastnostech zdroje zapálení.

Na *vznik požáru* mají vliv jak různé druhy paliva (v pevném, plynném či kapalném skupenství), tak i zdroj hoření, respektive zdroj vznícení (radiační, konvekční či kondukční tepelný tok).

Pro vznik požáru ve *směsi plynných hořlavých látek* je zapotřebí příhodný poměr paliva a vzduchu. Aby *látky kapalné či pevné* přešly na plynnou fázi, je nutné jim dodat energii. U kapalin závisí množství požadované energie na intenzitě vypařování, aby se dosáhlo optimální koncentrace par nad hladinou kapaliny, která by vytvořila spolu se vzduchem hořlavou směs. Je-li kapalina absorbována pórovitým materiálem, závisí energetický požadavek pro vznícení rovněž na rychlosti absorpce energie a zahřátí pórovitého materiálu. V tomto případě je proces vznícení řízen tepelnými vlastnostmi pórovitého materiálu.

U *plynných nebo kapalných paliv* je obvykle úkolem projektanta posoudit, zda může v hodnoceném prostoru vzniknout zápalná směs.

Ve stavebních objektech vzniká většina požárů vznícením *pevných látek*. Pevné materiály mají obvykle sklon k pyrolýze. Smísí-li se produkty pyrolýzy se vzduchem, vzniká zápalná směs. Ke *vznícení směsi* dojde, překročí-li teplota směsi tzv. teplotu vznícení. Faktory, které tento proces řídí, jsou:

- skladba a poloha pevné látky,
- způsob vznícení,
- intenzita přestupu tepla ze zdroje hoření,
- tepelné vlastnosti pevné látky,
- přívod vzduchu.

U běžných zdrojů hoření (horký předmět, elektrický oblouk, doutnající materiál, plamen) jsou možné dva druhy vznícení:

- *vznícení žhnutím* - je exotermická reakce povrchu materiálu se vzduchem. Materiál, který se vznítí žhnutím, může po určitou dobu doutnat (např. při hoření materiálů uskladněných na hromadě). Za příznivých podmínek může žhnutí přejít do hoření plamenem, což napomůže k rychlému šíření požáru.
- *vznícení plamenem* - je vznícení, které vzniká v plynné směsi produktů pyrolýzy a vzduchu. Tento způsob hoření se může udržet pouze za vhodných vnějších podmínek. Nejsou-li podmínky pro plamenné hoření optimální, může hoření přejít do žhnutí nebo doutnání nebo zcela samovolně uhasnout.

Existují také materiály (např. při skladování většího množství stejného materiálu) náchylné k samovznícení tj. k oxidaci v prostředí. Zde je teplo vyvolané oxidací zachycováno díky nízkému potenciálu tepelných ztrát, a tak dochází ke kumulaci tepla a možnému vznícení.

1.2 Fáze rozvoje

Po iniciaci se požár rozrůstá a produkuje se stále větší množství energie. Ohraničení daného prostoru stavebními konstrukcemi nemá v prvotní fázi znatelný vliv na vlastní požár – *požár je řízen palivem* a má lokální charakter.

S rozvojem požáru dochází ke zvyšování teploty produktů hoření a snižování jejich hustoty, což má za následek nárůst teplotní diference, rozdílu jejich hustoty vůči okolí a tedy vznik vztlaku. Nad požárem se formuje sloupec zplodin hoření, který se označuje pojmem *Fire Plume*. Do sloupce je přisáván chladnější okolní vzduch, což způsobuje zvětšování objemu a snižování teploty kouřových plynů.

Sloupec zplodin hoření postupně stoupá až na úroveň stropu, kde se začne v relativně tenké vrstvě rozprostírat až k ohraničujícím konstrukcím. Tento jev se nazývá *podstropní proudění*. Dochází při něm k ochlazování kouře v důsledku odvodu tepla do ohraničujících konstrukcí.

Když kouřové plyny „narazí“ na ohraničující konstrukce, obrátí se směrem k podlaze. Sloupec kouřových plynů poté vytváří *vrstvu kouře*, která se postupně prohlubuje a klesá k podlaze.

Překročí-li teplota horké vrstvy kouře 500 – 600 ºC [2] nebo hustota tepelného toku na úrovni podlahy 20 kW.m^{-2}, dochází k *celkovému vzplanutí (flashoveru)*.

V prostoru, kde došlo k celkovému vzplanutí, je nepravděpodobné přežití osob a vzhledem k zasažení celého prostoru požárem nelze předpokládat ani zmírnění škod na majetku následným hašením.

1.3 Plně rozvinutá fáze

Po celkovém vzplanutí dosahuje požár rychle plně rozvinuté fáze, kdy je intenzita hoření řízena buď dostupným *palivem*, nebo existujícím *větráním*. Plně rozvinutá fáze je charakterizována v podstatě stálou intenzitou požáru a maximálními teplotami v prostoru. Průběh plně rozvinuté fáze [3] je stěžejní při posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí.

2 Rychlost uvolňování tepla

Rychlost uvolňování tepla (heat release rate – HRR nebo *rate of heat release* – RHR) představuje energii uvolňovanou hořlavým materiálem jako funkci času. Tato veličina je základním parametrem pro určení intenzity hoření, u běžně užívaných předmětů se vyjadřuje v řádech stovek kilowatt až několika megawatt.

Všeobecně se stanovuje časová závislost rychlosti uvolňování tepla k danému scénáři dvěma způsoby. První způsob je založen na znalosti konkrétního množství a typu hořlavého materiálu v posuzovaném úseku. Příkladem mohou být dřevěné palety naskladněné na konkrétní ploše do určité maximální výšky nebo požár známé hořlavé kapaliny v havarijní jímce o daných rozměrech. Rychlost uvolňování tepla a její závislost v čase je v tomto případě možné stanovit na základě dat získaných z uskutečněných zkoušek nebo výpočtem. Druhý způsob je obecnější a vychází ze znalosti využití posuzovaného úseku. Zde je nutné vycházet z dostupných statistických údajů o požárech, případně z detailního inženýrského posouzení.

Typické události související s rozvojem požáru a jejich účinky jsou [4]:

celkové vzplanutí	rychlý přechod do plně rozvinutého stádia požáru
aktivace stabilních hasicích zařízení	stálá nebo klesající intenzita požáru
manuální hašení	stálá nebo klesající intenzita požáru
spotřebování paliva	dohořívání
změna odvětrání	změna charakteristiky požáru

2.1 Stanovení rychlosti uvolňování tepla

Jedna z běžných metod stanovení rychlosti uvolňování tepla [1], [2] je výpočet ze znalosti efektivní výhřevnosti a hmotnostní rychlosti odhořívání:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_{eff} \tag{1}$$

kde $\dot{Q}$ rychlost uvolňování tepla, HRR (kW)
$\dot{m}$ hmotnostní rychlost odhořívání (kg.s^{-1})
ΔH_{eff} efektivní výhřevnost (kJ.kg^{-1})

Známe-li hmotnostní rychlost odhořívání vztaženou na jednotku plochy a celkovou plochu odhořívání, můžeme rovnici přepsat do následující podoby:

$$\dot{Q} = A_F \dot{m}'' \Delta H_{eff} \tag{2}$$

kde A_F plocha odhořívání (m^2)
$\dot{m}''$ hmotnostní rychlost odhořívání z 1 m^2 (kg·s^{-1}·m^{-2})

Výhřevnost bývá obvykle určena laboratorně za podmínek blízkých dokonalému spalování, kde hoření vzorku probíhá za vyššího tlaku a v čistém kyslíku. Protože jsou podmínky u reálných požárů odlišné, musíme zohlednit i nedokonalost procesu spalování a počítat pouze s efektivní hodnotou výhřevnosti. Poměr mezi efektivním a celkovým spalným teplem se nazývá efektivnost spalování χ_s.

$$\chi_s = \frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_c} \tag{3}$$

kde χ_s součinitel efektivnosti spalování (-)
ΔH_C celková výhřevnost (kJ.kg^{-1})

Úprava rovnice (2) je potom následující:

$$\dot{Q} = A_F \dot{m}'' \chi_s \Delta H_c \tag{4}$$

2.2 Rychlost uvolňování tepla hořlavých kapalin

Z výsledků požárních zkoušek vyplývá, že se zvětšujícím se průměrem plochy hoření kapalin dochází k nárůstu rychlosti odhořívání až na určitou hodnotu, která se nazývá asymptotická rychlost odhořívání m”$_\infty$.

Rychlost odhořívání dále závisí na dvou empirických konstantách, které charakterizují vliv zpětné radiace z plamene na hořící kapalinu. Pro účely požárních výpočtů se v literatuře uvádí přímo výsledný koeficient *kß*.

Závislost hmotnostní rychlosti odhořívání na průměru plochy odhořívání má pak pro konkrétní hořlavé kapaliny podobu:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_\infty (1 - e^{-k\beta D}) \tag{5}$$

kde $\dot{m}''_{\infty}$ asymptotická hmotnostní rychlost odhořívání kapalin (kg·s^{-1}·m^{-2})

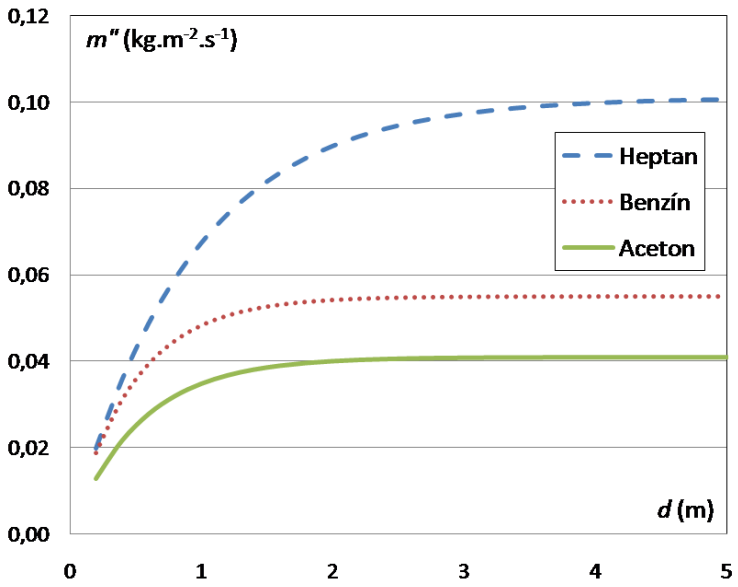
$k\beta$ materiálová konstanta pro hořlavé kapaliny (m^{-1})

D charakteristický rozměr (průměr) plochy odhořívání (m)

V následující tabulce se nachází příklady potřebných veličin pro stanovení hmotnostní rychlosti odhořívání hořlavých kapalin:

Tab. 1 – Charakteristiky hořlavých kapalin [5]

Materiál	$\dot{m}''_{\infty}$ (kg·s^{-1}·m^{-2})	$k\beta$ (m^{-1})	ΔH_c (kJ.kg^{-1})	ρ (kg.m^{-3})
heptan	0,101	1,1	44 600	675
benzín	0,055	2,1	43 700	740
aceton	0,041	1,9	25 800	791



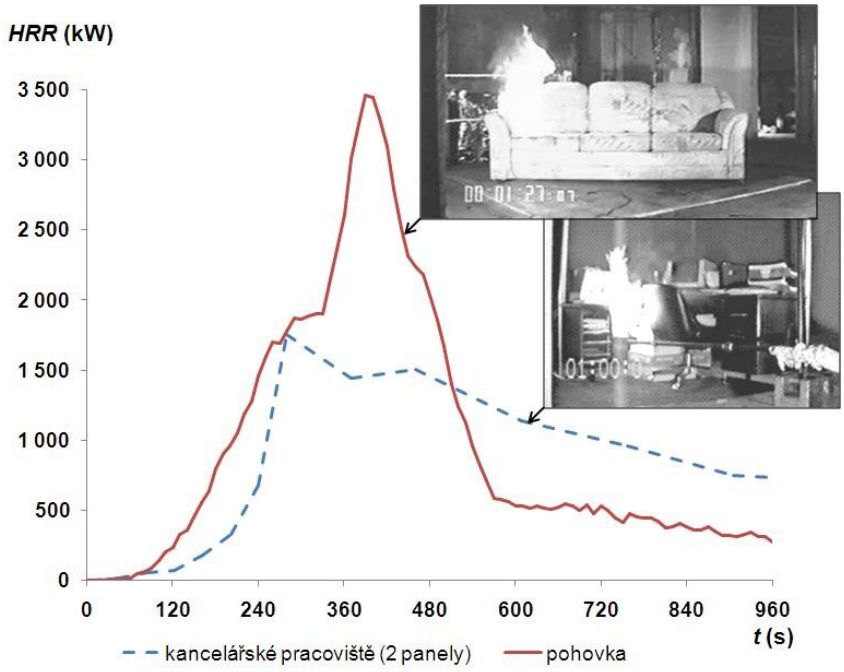
Obr. 2 – Závislost hmotnostní rychlosti hoření na průměru plochy odhořívání pro vybrané látky

2.3 Stanovení rychlosti uvolňování tepla na základě provedených zkoušek

V případech, kdy je soubor hořlavých látek pro požární scénář [7] dobře definován a není pravděpodobné, že by se během návrhové životnosti měnil, je možné použít jako návrhový požár skutečnou charakteristiku HRR tohoto souboru hořlavých látek. Je zde nutný dostatečně konzervativní přístup, aby byl návrhový požár vždy na straně bezpečnosti.

Návrhový požár může vycházet ze skutečné charakteristiky hoření referenčního souboru hořlavých látek, pokud je možno prokázat, že:

- je konzervativní a pravděpodobně nebude během návrhové životnosti objektu překročena skutečným souborem hořlavých látek;
- podmínky, při nichž byla rychlost uvolňování stanovena, představují podmínky, které budou pravděpodobně existovat během analyzovaného návrhové požárního scénáře;
- požár se pravděpodobně nepřenese na další soubory hořlavých látek, které nebyly uvažovány.



Obr. 3 – HRR požáru pohovky a kancelářského pracoviště [1]

2.4 t-kvadratický požár

Představíme-li si požár reálných komodit a budeme chtít pro výpočet HRR použít výše uvedené rovnice, narazíme na nemalé komplikace. Hořící předměty se často skládají z více materiálů (včetně různých na sobě uložených vrstev) a plocha odhořívání se v závislosti na čase mění i podle orientace hořící části. Výpočet HRR pomocí předchozích rovnic může být proto v praktických příkladech obtížný, ne-li nerealizovatelný.

Z výsledků reálných požárních zkoušek vyplývá, že je možné počáteční fázi požáru charakterizovat jednoduchou, na čase závislou parabolickou křivkou. Křivka je známá jako křivka *t-kvadratického požáru*, kde rychlost uvolňování tepla je úměrná druhé mocnině času.

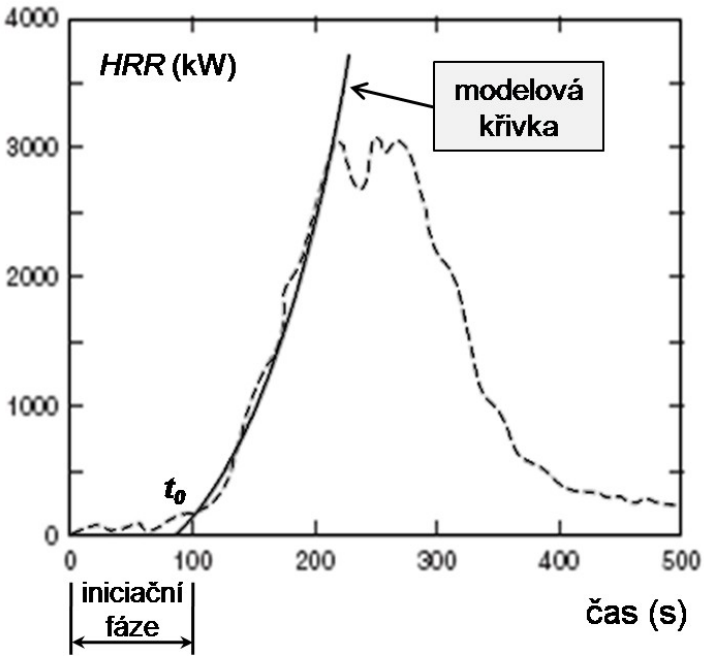
Heskestad popsal idealizovaný rozvoj požáru následující parabolickou rovnicí (obr. 4):

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2 \qquad (6)$$

kde α koeficient rozvoje požáru (kW/s^2)

t čas po iniciaci (s)

t_0 čas efektivní iniciace (s)



Obr. 4 – Idealizovaný rozvoj požáru pohovky [5]

Všeobecně se přepokládá, že pro kvantifikaci návrhového požáru je možné iniciační fázi rozvoje požáru zanedbat. Čas t pak představuje čas po tzv. efektivní iniciaci. Rovnice (6) má potom tvar:

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \tag{7}$$

Rovnice t-kvadratického požáru se objevuje i v podobě:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \left(\frac{t}{t_g}\right)^2 \tag{8}$$

kde $\dot{Q}_0$ referenční rychlost uvolňování tepla (=1000 kW)

t_g doba potřebná pro dosažení referenční rychlosti (s)

Pro výpočet součinitele t_g z veličin používaných v českých technických normách mohou být využity následující převodní vzorce:

$$t_g = \frac{1500}{a \cdot \sqrt{p}} \quad \text{pro nevýrobní objekty} \tag{9}$$

$$t_g = \frac{1500}{\sqrt{\bar{p}}} \quad \text{pro výrobní a skladové objekty} \tag{10}$$

kde a součinitel rychlosti odhořívání dle ČSN 73 0802 (-)

p požární zatížení dle ČSN 73 0802 (kg.m^{-2})

$\bar{p}$ průměrné požární zatížení dle ČSN 73 0804 (kg.m^{-2})

Z praktických důvodů byly vytvořeny čtyři kategorie rozdělující požáry dle rychlosti rozvoje, viz tabulka 2. V následujících tabulkách 3 a 4 jsou uvedeny příklady pro jednotlivé kategorie.

Tab. 2 – Charakteristické druhy požárů [2]

Rychlost rozvoje požáru	α (kW.s^{-2})	t_g (s)
pomalá	0,003	600
střední	0,012	300
rychlá	0,047	150
velmi rychlá	0,19	75

Tab. 3 – Ukázky požárních scénářů pro jednotlivé kategorie požárů [1]

Rychlost rozvoje požáru	Příklady scénářů
pomalá	podlahová krytina
střední	kancelářský nábytek prodejní pulty
rychlá	lůžkoviny čalouněné paravánové systémy
velmi rychlá	čalouněný nábytek lehký dřevěný nábytek nahromaděný balicí materiál uskladněná plastová pěna aj.

Tab. 4 – Příklady provozů pro jednotlivé kategorie požárů a HRR vztažená na 1 m^2 (ČSN EN 1991-1-2 [3])

Rychlost rozvoje požáru	Provoz	HRR“ (kW/m^2)
pomalá	doprava (místa pro veřejnost)	**250**
střední	hotelové a nemocniční pokoje	
	byty a rodinné domy	
	kanceláře	
	školní třídy	
rychlá	nákupní centra	
	divadla (kina)	**500**
	knihovny	

2.5 Požáry řízené odvětráním

V běžných místnostech jsou požáry po celkovém vzplanutí řízeny odvětráním, a proto rychlost hoření závisí na přístupu vzduchu, tedy na velikosti a tvaru větracích otvorů. Intenzita hoření v místnosti zůstává přibližně konstantní, neboť velikost otvorů omezuje přístup vzduchu, čímž rovněž udržuje konstantní rychlost uvolňování tepla. Teplota plynů v místnosti pak závisí na tepelné rovnováze mezi vytvářením tepla (hořením) a ztrátou tepla otvory a ohraničujícími konstrukcemi. Teplotu v místnosti lze často brát jako homogenní.

Pro výpočet maximální rychlosti uvolňování tepla požáru řízeného odvětráním $\dot{Q}_{vent}$ (MW) slouží následující rovnice:

$$\dot{Q}_{vent} = 0{,}1 \cdot \chi_s \cdot H_w \cdot A_o \sqrt{h_o} \tag{11}$$

kde Q_{vent} max. HRR požáru řízeného odvětráním (MW)

H_w normová výhřevnost dřeva (MJ.kg^{-1})
- ČSN EN 1991-1-2 H_w = 17,5 MJ.kg^{-1}
- ČSN 73 0824 H_w = 16,75 MJ.kg^{-1}

A_o plocha otevřených otvorů (m^2)

h_o výška otevřených otvorů (m)

2.6 Konvektivní podíl HRR

Pro výpočet některých níže uvedených parametrů požáru bude nutné znát konvektivní část z celkového uvolňovaného tepla:

$$\dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q} \tag{12}$$

kde $\dot{Q}_c$ konvektivní rychlost uvolňování tepla (kW)

χ_c konvektivní součinitel (-)

Hodnota konvektivního součinitele se pro pevné látky a kapaliny obvykle pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,7. Pro okysličená kapalná paliva může však dosáhnout i hodnot 0,8 a vyšších. Například v ČSN EN 1991-1-2 je v příloze C [3] uvedena rovnice právě s konvektivním součinitelem 0,8. Běžně se ale při výpočtech používá χ_c = 0,7 a tedy:

$$\dot{Q}_c = 0{,}7\dot{Q} \tag{13}$$

3 Lokální požár

V počáteční fázi rozvoje se požáru účastní pouze omezená část požárního zatížení v určité části požárního úseku. K popisu požáru ve fázi rozvoje je proto vhodné použít *model lokálního požáru*, u kterého se předpokládá nerovnoměrné rozdělení teploty v prostoru.

Pomocí modelu lokálního požáru je možno získat následující údaje:

- tepelné zatížení v okolí požáru způsobené plameny a prouděním horkých zplodin hoření,

- hmotnostní proudění zplodin hoření v různé výšce,
- průběh zakouření prostoru včetně vlivu požárně bezpečnostních zařízení,
- dobu aktivace hlásičů.

Rozvíjející se lokální požár je doprovázen vznikem a rozvojem sloupce kouřových plynů, který je zpravidla označován jako *Fire Plume*.

Fire Plume se nad rozvíjejícím požárem začíná formovat již od samotného počátku. V případě, že není ovlivněn okolními vlivy (např. prouděním vzdušiny, stavebními konstrukcemi), nabývá tvaru převráceného kužele.

Fire Plume [10] lze rozdělit na tři zóny. Jde o:

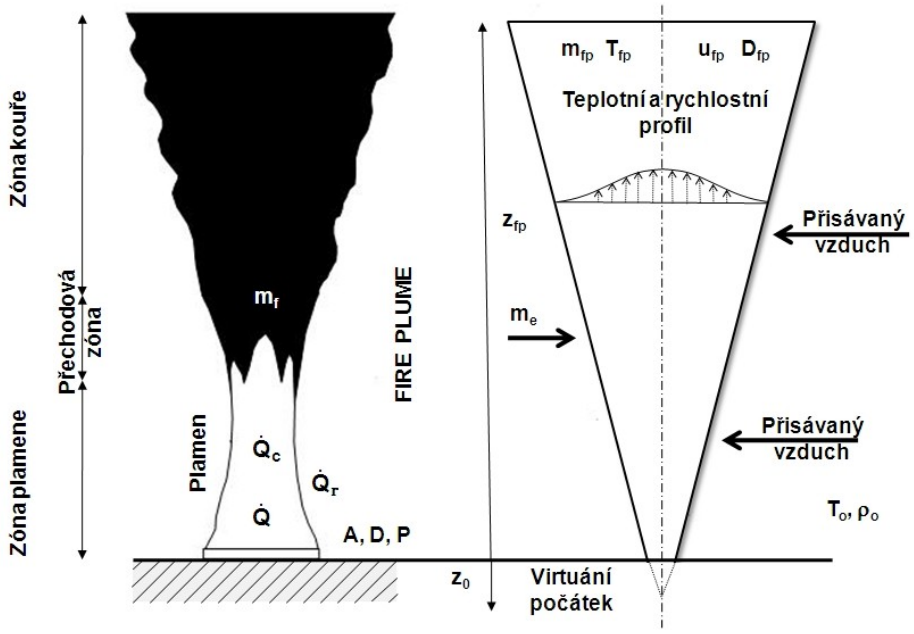
- zónu plamene,
- přechodovou zónu,
- zónu kouře.

Zóna plamene tvoří oblast těsně nad povrchem hořlavého materiálu, která je charakteristická přibližně stálým plamenem a zvyšující se rychlostí proudění plynů.

Přechodová zóna je oblastí, která propojuje zónu plamene a zónu kouře Fire Plume. Přechodová zóna je charakterizována občasným plamenem a přibližně konstantní rychlostí proudění hořících plynů.

Zóna kouře je konečnou, mnohdy nejrozsáhlejší, oblastí Fire Plume. Je tvořena sloupcem plynných zplodin hoření bez plamene a charakterizována klesající rychlostí proudění hořících plynů, teplotou, koncentrací toxických zplodin hoření a pevných částic s narůstající výškou.

Charakteristický tvar osově symetrického Fire Plume je znázorněn na obr. 5.



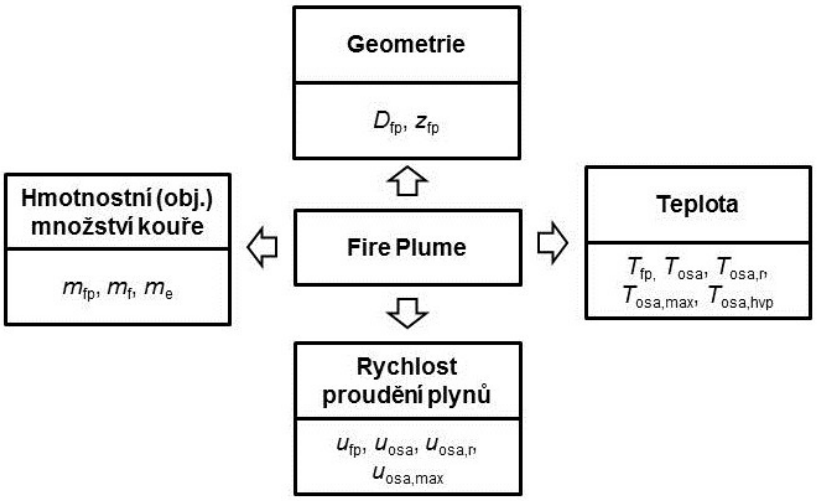
Obr. 5 – Charakteristický tvar Fire Plume [1]

Obecně je možné Fire Plume členit do následujících kategorií:

- axisymetrický,
- stěnový,
- rohový,
- rozlévající (např. přes balkóny),
- vytékající (okenním nebo dveřním otvorem).

Fire Plume byl zájmem studia mnoha zahraničních odborníků, kteří teoreticky odvozovali, prognózovali a měřili charakteristické parametry doprovázející jeho vznik a rozvoj. Mezi základní charakteristiky Fire Plume lze zařadit:

- geometrie (průměr D_{fp}, výška z_{fp}),
- teplotu (průměrná teplota $T_{fp,}$ osová teplota T_{osa}, teplota v radiální vzdálenosti od osy $T_{osa,r}$, maximální osová teplota $T_{osa,max}$, teplota osy při působení horké vrstvy plynů $T_{osa,hvp}$),
- rychlost proudění plynů (rychlost proudění plynů u_{fp}, osová rychlost proudění plynů u_{osa}, rychlost proudění plynů v radiální vzdálenosti $u_{osa,r}$, maximální osová rychlost proudění plynů $u_{osa,max}$),
- hmotnostní (objemové) množství kouře (hmotnostní množství kouře m_{fp}, hmotnostní množství kouře vznikajícího hořením materiálů m_f, hmotnostní množství přisávaného vzduchu m_e).



Obr. 6 – Základní charakteristiky Fire Plume [8]

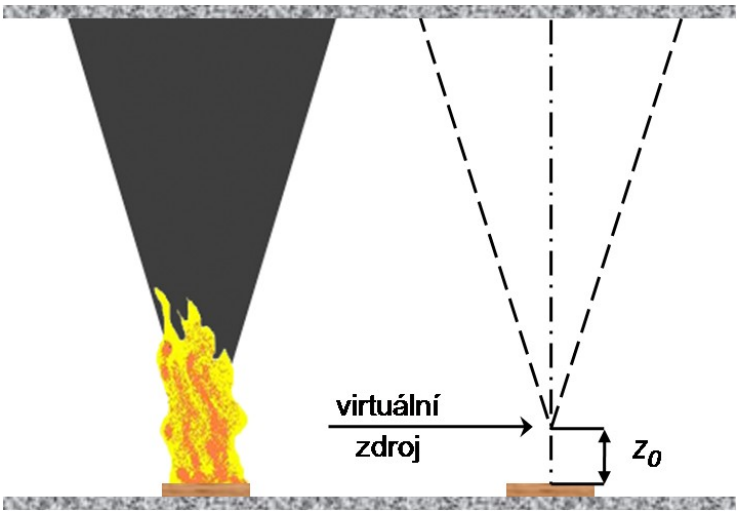
3.1 Virtuální zdroj hoření

Virtuálním zdrojem se rozumí pomyslný bodový zdroj hoření, ze kterého vychází ve tvaru kužele sloupec zplodin hoření. Pro požáry o nízké hodnotě rychlosti uvolňovaného tepla na velké ploše má hodnota z_0 (m) zápornou hodnotu a naopak pro požáry o vysoké rychlosti uvolňovaného tepla na malé ploše kladnou hodnotu.

Rozsah matematických rovnic pro vyjádření virtuálního počátku Fire Plume je značný. Rovnice bývá pro běžné atmosférické podmínky uváděna v následující podobě:

$$z_0 = -1{,}02D + 0{,}083\dot{Q}^{2/5} \tag{14}$$

kde z_0 poloha virtuálního zdroje hoření vůči základně paliva (m)



Obr. 7 – Model lokálního požáru s virtuálním zdrojem [9]

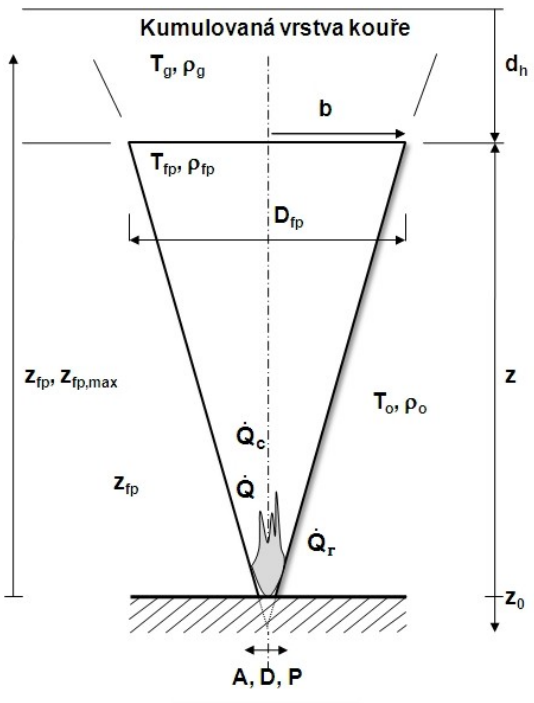
Ačkoli byly rovnice získány z experimentů za různých podmínek, výsledky stanovení virtuálního počátku Fire Plume jsou srovnatelné.

3.2 Geometrie sloupce kouřových plynů (Fire Plume)

Geometrický tvar Fire Plume je určen průměrem D_{fp} (poloměrem) a jeho výškou z_{fp}. Za předpokladu rozvoje Fire Plume bez ovlivnění jinými vlivy (stavebními konstrukcemi, větrem, vzduchotechnickými zařízeními aj.) dochází ke vzniku Fire Plume osově symetrického tvaru. Ve skutečnosti však může docházet k mnoha tvarovým deformacím, které vznikají z řady příčin. Jde zejména o vliv situování Fire Plume (volně v interiéru, u stěny nebo v rohu), vliv stavebních konstrukcí (např. balkóny, stropní nosníky) a provozní vlivy okolí (vzduchotechnická zařízení, vytápění aj.).

Geometrie Fire Plume je stanovována zpravidla z důvodu posouzení účinků na stavební konstrukce a uložené materiály.

Úhel rozevření Fire Plume se nachází v rozmezí 15 až 30° od osy, přičemž standardně bez hlubší analýzy podmínek vzniku Fire Plume je předpokládán úhel 15° mezi osovou a okrajovou částí Fire Plume. Charakteristický tvar Fire Plume a základní parametry související s jeho geometrií jsou znázorněny obr. 8.



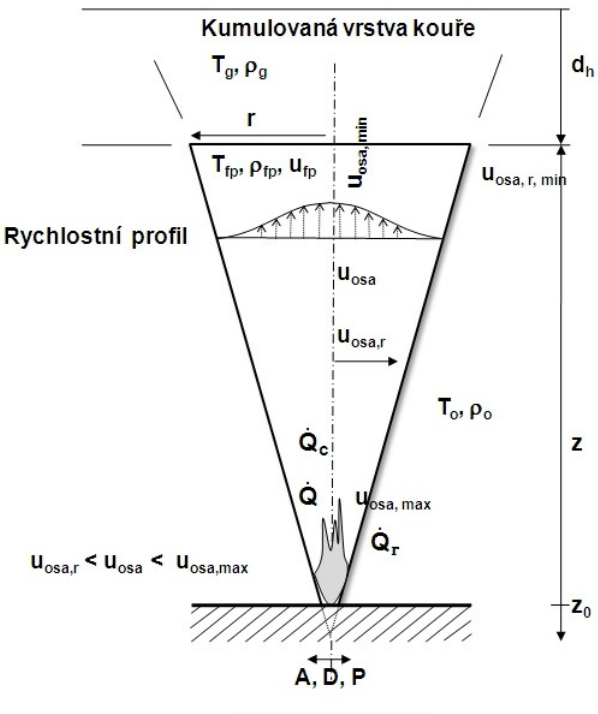
Obr. 8 – Geometrie Fire Plume osově symetrického tvaru [1]

3.3 Rychlost proudění sloupce kouřových plynů (Fire Plume)

Protože horké plyny mají nižší hustotu než okolní vzduch, dochází k nárůstu vztlaku. Jak horké plyny stoupají vzhůru, je k nim přisáván studený vzduch z okolního prostředí. Nad každým hořícím objektem se vytváří sloupec zplodin hoření, kterým je hmota a energie přenášena do okolí. Ve sloupci zplodin hoření dochází s narůstající výškou k nárůstu objemu kouře a zároveň poklesu teploty a koncentrace toxických produktů hoření.

Rychlostní profil proudění plynů ve Fire Plume zachovává charakteristický cylindrický charakter. Rychlost proudění plynů u_{fp} klesá se stoupající výškou sloupce kouřových plynů a radiální vzdáleností mezi osou a jeho okrajovou částí *r*. Maximální rychlosti proudění plynů $u_{osa,max}$ je dosahováno v osové části a nižších úrovních Fire Plume. Nejnižších rychlostí $u_{osa,r,min}$ je dosahováno v okrajových částech Fire Plume a jeho nejvyšších úrovních.

Rychlost proudění plynů ve Fire Plume je zpravidla hodnocena z důvodu posouzení účinků na evakuované osoby, posouzení účinků na stavební konstrukce, posouzení účinků na uložené materiály nebo posouzení účinků na záchranné jednotky.



Obr. 9 – Fire Plume s popisem rychlostních charakteristik [1]

Předmětem zájmu bývá standardně nejvyšší, tedy osová, rychlost proudění plynů ve Fire Plume u_{osa}. Pro dokreslení celkového obrazu rychlosti proudění plynů jsou však hodnoceny také rychlosti v jiných místech.

Osovou rychlost proudění plynů lze obecně popsat závislostí obecného tvaru $u_{\mathrm{osa}} = f(\dot{Q}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{n}}; z^{\mathrm{n}})$. Pro zohlednění jiného než bodového zdroje Fire Plume nebo při malých výškách nad povrchem hořlavých materiálů je nezbytné zohlednit virtuální počátek Fire Plume z_0.

Za normálních běžných atmosférických podmínek lze osovou rychlost proudění plynů ve Fire Plume stanovit rovnicí:

$$u_{\mathrm{osa}} = 1{,}03 \frac{\dot{Q}_{\mathrm{c}}^{1/3}}{(z - z_0)^{1/3}} \tag{15}$$

$$u_{\mathrm{osa}} = 0{,}54\left(\Delta T_{\mathrm{osa}} \cdot \dot{Q}_c\right)^{1/5} \tag{16}$$

kde $\dot{Q}_{\mathrm{c}}$ tepelný tok sdílený konvekcí (kW)

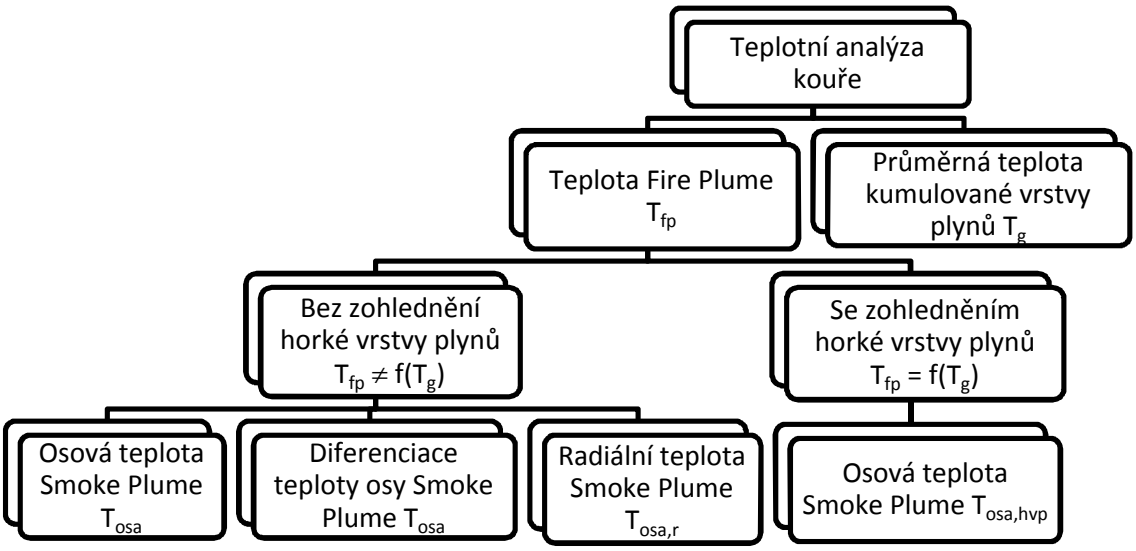
z výška nad povrchem hořlavých materiálů (m)

z_0 virtuální počátek Fire Plume (m)

ΔT_{osa} teplotní nárůst osy Fire Plume (K)

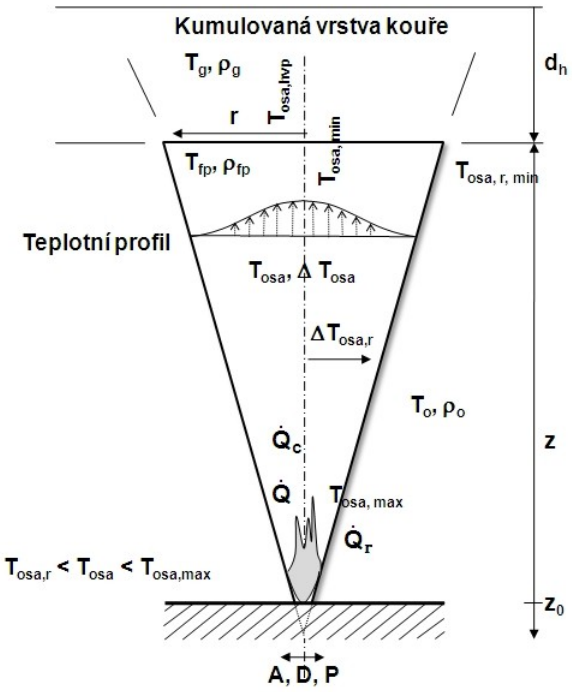
3.4 Teplota sloupce kouřových plynů (Fire Plume)

Teplotní analýza kouře může být z hlediska použitých metod a míry podrobností značně variabilní. Výpočetní metody je možné z hlediska jejich principu rozčlenit podle 10.



Obr. 10 – Teplotní analýza kouře [1]

Schematický popis teplotních charakteristik je patrný z obr. 11.



Obr. 11 – Fire Plume s popisem teplotních charakteristik [1]

Teplota plynů T klesá se stoupající výškou sloupce kouřových plynů a radiální vzdáleností mezi osou a jeho okrajovou částí r. Maximální teploty $T_{osa,max}$ je dosahováno v osové části a nejnižších úrovních Fire Plume. Nejnižších teplot $T_{osa,r,min}$ je dosahováno v okrajových částech Fire Plume a jeho nejvyšších úrovních. Teplotní profil proudění plynů ve Fire Plume, stejně jako rychlostní profil, zachovává cylindrický charakter.

Teplotní analýza kouře je prováděná z řady různých důvodů, přičemž mezi nejčastější lze zařadit zejména:

- návrh zařízení pro odvod kouře a tepla,
- posouzení účinků teploty na evakuované osoby,
- posouzení účinků teploty na stavební konstrukce,
- posouzení účinků teploty na uložené materiály,
- posouzení účinků teploty na záchranné jednotky.

Důvod provádění teplotní analýzy Fire Plume zpravidla určuje také druh teplotní charakteristiky, kterou je nutné stanovit.

Průměrnou teplotu kontrolního svazku, která bývá považována za teplotu kumulované vrstvy plynů, lze vyjádřit rovnicemi:

$$T_{\mathrm{g}} = T_0 + \Delta T_{\mathrm{g}} \tag{17}$$

$$\Delta T_{\mathrm{g}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{c}}}{m_{\mathrm{fp}} \cdot c_{\mathrm{p}}} \tag{18}$$

kde T_{g} teplota vrstvy plynů (K)

T_0 teplota okolí (K)

ΔT_{g} teplotní nárůst vrstvy plynů (K)

$\dot{Q}_{\mathrm{c}}$ tepelný tok sdílený konvekcí (kW)

m_{fp} hmotnostní množství plynů ve Fire Plume ($kg.s^{-1}$)

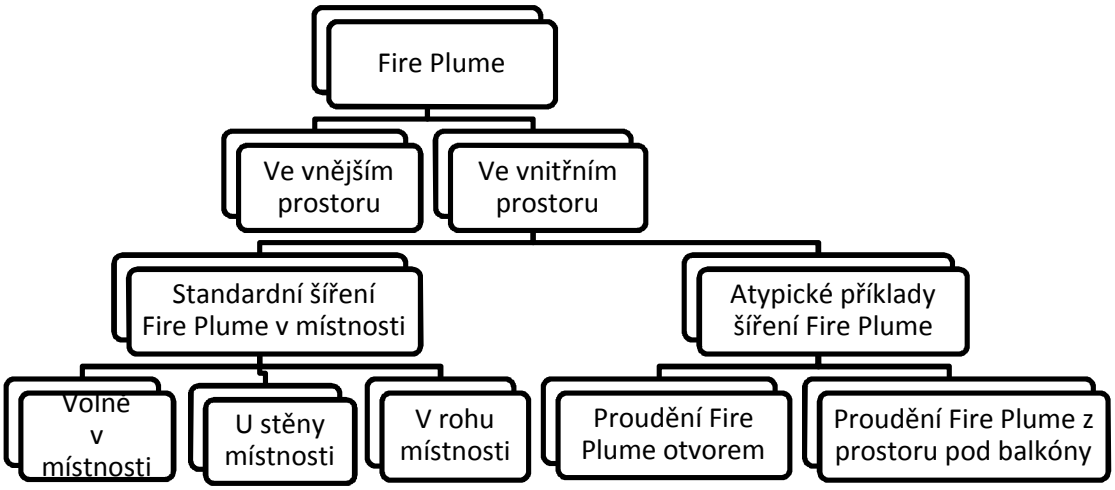
c_{p} měrná tepelná kapacita plynů ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)

Průměrná teplota kumulované vrstvy plynů je využitelná zejména při navrhování zařízení pro odvod kouře a tepla, při posuzování účinků teploty na evakuované osoby a záchranné jednotky, případně uložené materiály.

3.5 Hmotnostní analýza sloupce kouřových plynů (Fire Plume)

Jedním z nejvýznamnějších parametrů rozvíjejícího se Fire Plume je posouzení hmotnostního množství m nebo objemového množství V vznikajícího kouře a to jako celku, častěji však za časovou jednotku.

Fire Plume lze z pohledu hmotnostní analýzy členit z řady hledisek. Základní členění je znázorněno na obr. 12.



Obr. 12 – Členění Fire Plume z pohledu hmotnostní analýzy [1]

Obecně lze množství vzduchu přisávaného do Fire Plume stanovit jednoduchými funkcemi, které zohledňují výšku přisávání vzduchu do sloupce Fire Plume *z*, uvolňovaný tepelný tok $\dot{Q}$ nebo obvod požáru *P*:

Hmotnostní množství Fire Plume je ovlivněno také dalšími vlivy. Jedná se především o:

- *geometrii zdroje požáru a virtuální počátek* – pro použití rovnic pro stanovení hmotnostního množství kouře je významná geometrie zdroje požáru. Zdroje požáru lze rozdělit na bodové, kruhové, pravoúhlé či liniové. Ačkoli bylo nejvíce poznatků získáno z experimentů s bodovými zdroji požáru, jsou závěry často zobecňovány také pro další možné typy zdrojů, přičemž rozsah průkazných verifikací je značně omezený. Fire Plume lze v tomto kontextu rozdělit na osově symetrické a pravoúhlé.
- *situování v prostoru* – Ačkoli bylo nejvíce poznatků získáno z experimentů s bodovými zdroji požáru, jsou závěry často zobecňovány také pro další možné typy zdrojů, přičemž rozsah průkazných verifikací je značně omezený. Fire Plume lze v tomto kontextu rozdělit na osově symetrické a pravoúhlé.

Zvláštními případy volného šíření Fire Plume jsou situace, kdy je určitým způsobem omezeno přisávání okolního vzduchu m_e do sloupce kouře. Zdroj požáru je umístěn u stěny nebo v rohu dispozice. V těchto případech je nutné při výpočtech zohlednit korekční stěnový faktor k_{sf}.

- *koeficient přisávání vzduchu* – V některých případech je pro stanovení hmotnostního množství kouře m využíván koeficient přisávání vzduchu C_e. Popisovaný koeficient charakterizuje schopnost přisávat vzduchu při volném šíření Fire Plume v prostoru.
- *konvektivní poměr tepelného toku* – Pro stanovení hmotnostního množství kouře *m* má zásadní význam tepelný tok sdílený konvekcí $\dot{Q}_c$. Konvektivní část celkového

tepelného toku je zejména v počáteční fázi rozvoje požáru podstatná a nachází se v intervalu 40 až 80 % z celku. Standardně je možné předpokládat konvektivní poměr 65 až 80 % z celku ($\dot{Q}_c \approx 0{,}65\ až\ 0{,}8\dot{Q}$). V současné době je evropskými předpisy upřednostňována horní hodnota uvedeného intervalu.

3.6 Omezení platnosti modelu lokálního požáru

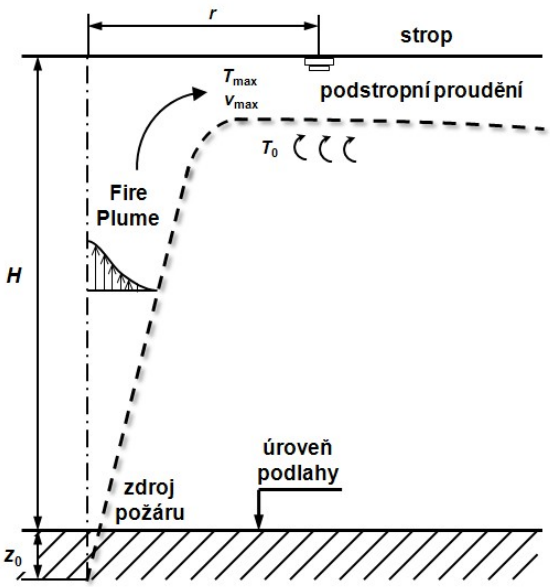
Na závěr této kapitoly věnované lokálním požárům a sloupci kouřových plynů (Fire Plume) je nutné připomenout, že relevantní výsledky obdržíme jen za podmínky dodržení rozsahu platnosti jednotlivých vztahů. Jak již bylo uvedeno, model lokálního požáru lze uplatnit jen v případě, že v posuzovaném prostoru nedojde k celkovému vzplanutí.

ČSN EN 1991-1-2 [3] uvádí pro rovnice popisující lokální požáry rovněž omezené použití pro charakteristický rozměr $D \leq 10$ m a rychlost uvolňování tepla $\dot{Q} \leq 50$ MW.

4 Podstropní proudění

S postupným rozvojem požáru dochází ke zvyšování teploty plynných produktů hoření (zvýšení teplotního rozdílu mezi plynnými produkty spalování a okolím), snižování jejich hustoty (zvýšení rozdílu mezi hustotami plynných produktů spalování a okolím) a tím ke vzniku *vztlakového efektu*, který je jedním z činitelů ovlivňujících proudění vzdušiny. S rozvojem požáru nabývá tento efekt na významu.

Při dostatečném teplotním rozdílu stoupá sloupec zplodin hoření (Fire Plume) až k úrovni stropu nebo podhledu prostoru. Dosáhne-li sloupec zplodin hoření stropní konstrukce, dochází k jeho odklonu od linie osy požáru. Vytvoří se tak charakteristický, relativně rychlý pohyb plynných zplodin hoření nazývaný *podstropní proudění* – Ceiling Jet Flow (obr. 13).



Obr. 13 – Podstropní proudění pod neohraničeným stropem [1], [2]

Kouřové plyny se začnou v relativně tenké vrstvě pod stropem rozprostírat, a pak se postupně šíří ke konstrukcím ohraničujícím zdrojovou místnost. Při střetu s ohraničujícími konstrukcemi dochází ke změně směru proudění kouře k podlaze prostoru (nemá-li kouř dostatečnou teplotu, může se jeho šíření zastavit a následně dojít k *vrstvení kouře*). Změnou směru proudění jsou kouřové plyny vháněny do vrstvy, která má nižší teplotu a tedy vyšší hustotu. Proudění směrem k podlaze se působením vztlaku a třecích sil zpomaluje, až nakonec ustává, a směr proudění se opět obrací ke stropní konstrukci.

Podstropní proudění negativně ovlivňují případné otvory ve stropní konstrukci tím, že snižují akumulaci horké vrstvy kouře.

Faktory ovlivňující výpočet podstropního proudění jsou:

- konstantní nebo časově proměnná rychlost uvolňování tepla,
- neohraničená nebo ohraničená stropní konstrukce,
- rovný nebo zkosený tvar stropní konstrukce.

Důležitým podnětem pro bližší zájem o průběh podstropního proudění v počáteční fázi rozvoje požáru byla snaha získat údaje odezvy požárních hlásičů a sprinklerových hlavic stabilních hasicích zařízení umístěných v blízkosti stropní konstrukce. Aby bylo možné zjistit optimální odezvu těchto požárně bezpečnostních zařízení, jsou empiricky stanoveny zejména tyto veličiny podstropního proudění:

- maximální teplota T_{max},
- maximální rychlost proudění plynů v_{max},
- charakteristická šířka podstropního proudění podle teplotního profilu l_T, popř. podle rychlostního profilu l_v,
- konvektivní tepelný tok působící na stropní konstrukci $\dot{q}_c''$.

4.1 Určení maximální teploty a rychlosti podstropního proudění

Pro idealizovanou neohraničenou stropní konstrukci byly *Alpertem* [11] odvozeny rovnice pro stanovení maximální teploty a rychlosti proudění horkých plynů za stálé rychlosti uvolňování tepla. Tyto rovnice byly sestaveny na základě experimentálních měření, s různými druhy tuhých a kapalných paliv, vykazujících rychlost uvolňovaného tepla v rozsahu od 668 kW do 98 MW a s rozdílnými výškami stropu od 4,6 m do 15,5 m. Rovnice pro určení maximálních teplot a rychlosti proudění horkých plynů podstropního proudění jsou rovněž rozděleny do dvou oblastí. V blízkosti požáru jsou odvozené rovnice nezávislé na radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření *r* (m), zato pro vzdálenější oblast od požáru má již veličina *r* vliv na výpočet. Pak platí:

Maximální teplota T_{max} (°C):

$$T_{\max} - T_0 = 16{,}9 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \qquad \text{pro } r/H \leq 0{,}18 \tag{19}$$

$$T_{max} - T_0 = 5{,}38 \frac{\dot{Q}^{2/3}/H^{5/3}}{(r/H)^{2/3}} \quad \text{pro } r/H > 0{,}18 \tag{20}$$

kde T_0 teplota vnějšího prostředí (°C); obvykle 20 °C

$\dot{Q}$ rychlost uvolňování tepla (kW) – viz kapitola 2

H výška stropu nad zdrojem požáru (m)

r radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření (m); maximální hodnota r je $2.H$

Maximální rychlost proudění plynů v_{max} (m.s^{-1}):

$$v_{max} = 0{,}96 \left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{1/3} \quad \text{pro } r/H \leq 0{,}15 \tag{21}$$

$$v_{max} = 0{,}195 \frac{(\dot{Q}/H)^{1/3}}{(r/H)^{5/6}} \quad \text{pro } r/H > 0{,}15 \tag{22}$$

Výše uvedené rovnice lze upřesnit zavedením konvektivní rychlosti uvolňování tepla $\dot{Q}_c$ (kW) prostřednictvím konvektivního zlomku rychlosti uvolňování tepla α (-) a doplněním polohy virtuálního zdroje hoření vůči základně paliva z_0 (viz obr. 13). Hodnota konvektivního zlomku rychlosti uvolňování tepla je pro mnoho hořících materiálů rovna 0,7.

4.2 Charakteristická šířka vrstvy podstropního proudění

Jak už bylo v úvodní části této kapitoly uvedeno, parametry podstropního proudění se sledují hlavně pro zjištění, zda dojde ke včasné reakci vybraných požárně bezpečnostních zařízení během počáteční fáze rozvoje požáru. Z téhož důvodu je dalším významným sledovaným parametrem podstropního proudění jeho *charakteristická šířka.* Vztahuje-li se tento parametr podstropního proudění k teplotnímu profilu l_T (m) je definován jako vzdálenost od povrchu stropní konstrukce k místu, v němž střední teplota podstropního proudění poklesne o hodnotu 1/e (tj. 1/2,718 = 0,368) maximální teploty v místě radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření r (viz obr. 14). Šířka této vrstvy zpravidla zaujímá 10 až 12 % světlé výšky místnosti, avšak nesmí překročit hodnotu 25 %.

Základní rovnici pro stanovení charakteristické šířky vrstvy podstropního proudění podle teplotního profilu l_T (m) odvodili *Motavelli* a *Marks* [1], a to na základě experimentálních měření a *Alpertově* teorii, takto:

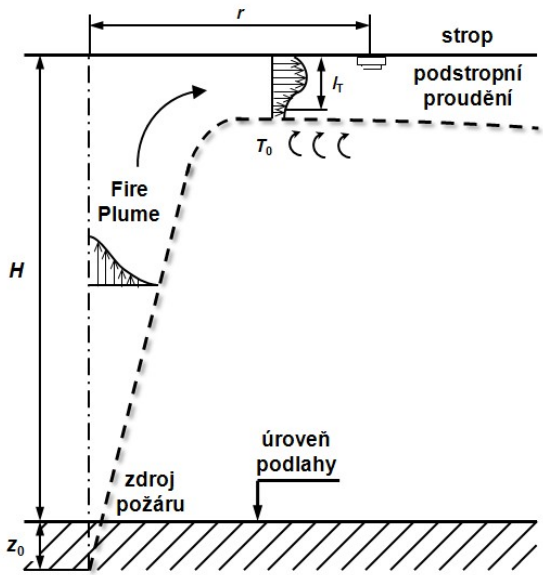
$$\frac{l_T}{H - z_0} = 0{,}112 \left[1 - \exp\left(-2{,}24 \frac{r}{H - z_0}\right)\right] \tag{23}$$

Platnost rovnice $0{,}26 \leq r/(H - z_0) < 2{,}0$

kde H výška stropu nad zdrojem požáru (m)

z_0 poloha virtuálního zdroje hoření vůči základně paliva (m)

r radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření (m)



Obr. 14 – Charakteristická šířka vrstvy podstropního proudění [1], [2]

Analogicky byla odvozena rovnice pro určení charakteristické šířky vrstvy podstropního proudění dle rychlostního profilu l_v (m) takto:

$$\frac{l_v}{H-z_0} = 0{,}205\left[1-\exp\left(-1{,}75\frac{r}{H-z_0}\right)\right] \tag{24}$$

Platnost rovnice $0{,}26 \leq r/(H-z_0) < 0{,}75$

Nevýhodou rovnice (24) je její menší rozsah platnosti oproti rovnici (23), která díky svým mezím vykazuje přijatelnější výsledky.

4.3 Působení konvekce podstropního proudění v blízkosti stropu

Dalším významným parametrem podstropního proudění je jeho tepelný tok, jenž působí v blízkosti stropu. Na počátku požáru je hlavním činitelem tepelného toku Fire Plume (obsahujícího zvláště kouřové plyny) *přenos tepla konvekcí*, který ovlivňuje nejen aktivaci požárních hlášení, ale může způsobit poškození předmětů instalovaných pod stropem (např. kabelových rozvodů, potrubí). Maximálních hodnot dosahuje konvektivní složka tepelného toku právě na počátku požáru, kdy stropní konstrukce ještě není zahřátá, tj. je blízká teplotě vnějšího okolí T_0 (°C).

Pro idealizovanou neohraničenou stropní konstrukci byly *Youem* a *Feathem* na základě experimentálních měření odvozeny výchozí rovnice pro určení *konvekce podstropního proudění* $\dot{q}_c''$ (kW.m^{-2}) [1], [2]. Tyto vztahy zavádějí pro určení konvekce Rayleighovo číslo *Ra* (-). Analogicky k výpočtům maximálních teplot v předchozí části je oblast podstropního proudění rozdělena do dvou úseků. V blízkosti požáru (oblast odklonu proudění zplodin hoření od osy požáru) jsou výsledné hodnoty nezávislé na radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření *r* (m), zato v místech vzdálenějších od osy požáru má již veličina *r* na výpočet

významný vliv. Má-li stropní konstrukce teplotu vnějšího okolí T_0 (°C), pak konvekce podstropního proudění $\dot{q}_c''$ (kW.m^{-2}) je dána takto:

$$\dot{q}_c'' = 38{,}6 \frac{\dot{Q}_c}{(H-z_0)^2.Ra^{1/6}} \qquad \frac{r}{H-z_0} \leq 0{,}2 \tag{25}$$

$$\dot{q}_c'' = 4{,}8 \frac{\dot{Q}_c}{(H-z_0)^2.Ra^{1/6}} \left(\frac{r}{H-z_0}\right)^{-1{,}3} \qquad 0{,}2 < \frac{r}{H-z_0} < 2{,}0 \tag{26}$$

kde $\dot{Q}_c$ konvektivní rychlosti uvolňování tepla (kW)

H výška stropu nad zdrojem požáru (m)

z_0 poloha virtuálního zdroje hoření vůči základně paliva (m)

r radiální vzdálenosti od osy sloupce zplodin hoření (m)

Ra Rayleighovo číslo (-)

$$Ra = \frac{g.\dot{Q}_c(H-z_0)^2}{3{,}5p.v^3} \tag{27}$$

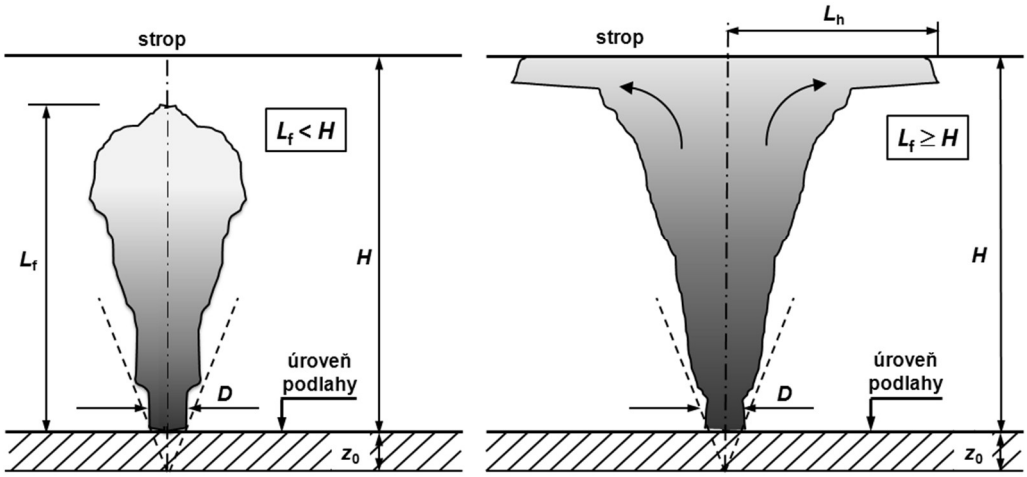
g gravitační zrychlení (m.s^{-2}); g = 9,806 m.s^{-2}

p absolutní tlak vzduchu (kPa)

v kinematická viskozita vzduchu (m^2.s^{-1})

4.4 Plameny zasahující strop

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, Fire Plume je rozdělen do několika zón. Zóna plamene tvoří nejprve oblast těsně nad hořícím povrchem hořlavého materiálu. Zpočátku se plameny volně šíří nad zdrojem požáru (volné hoření), s rozvojem požáru však mohou plameny dosáhnout stropní konstrukce. Při dosažení stropní konstrukce dochází k odklonu plamene od linie osy požáru stejně, jako u kouřových plynů. Šíření plamene se v uzavřeném prostoru dělí dle obr. 15 do dvou základních typů a to na:



a) Plameny nezasahují strop b) Plameny zasahují strop

Obr. 15 – Rozvoj plamenů v uzavřeném prostoru [1]

- *plameny nezasahující strop* $\Rightarrow$ $L_f < H$ (délka plamenů je menší než je výška stropu nad zdrojem požáru),
- *plameny zasahující strop* $\Rightarrow$ $L_f \geq H$ (délka plamenů je rovna či větší než je výška stropu nad zdrojem požáru). V tomto případě je třeba stanovit vodorovnou délku plamene L_h, která vytyčuje prostor radiálního rozšíření plamenů pod stropem.

Na základě velikosti tepelného výkonu a průměru zdroje požáru (lokální požár) byly odvozeny nejužívanější rovnice pro výpočet délky plamene L_f (m), popř. střední výšky plamene, takto [3], [12]:

Heskestad:

$$L_f = -1{,}02D + 0{,}235\dot{Q}^{2/5} \tag{28}$$

ČSN EN 1991-1-2 (upravená rovnice Heskestada):

$$L_f = -1{,}02D + 0{,}0148\dot{Q}^{2/5} \tag{29}$$

kde $\dot{Q}$ rychlost uvolňování tepla v (W)
D průměr požáru (m)

Zjistí-li se, že délka plamene je větší než výška stropu nad zdrojem požáru, pokračuje se ve stanovení vodorovné délky plamene L_h (m) podle následujících experimentálně odvozených vztahů:

Heskestad a Hamada:

$$L_h = 0{,}95(L_f - H) \tag{30}$$

ČSN EN 1991-1-2 (podle Hasemiho):

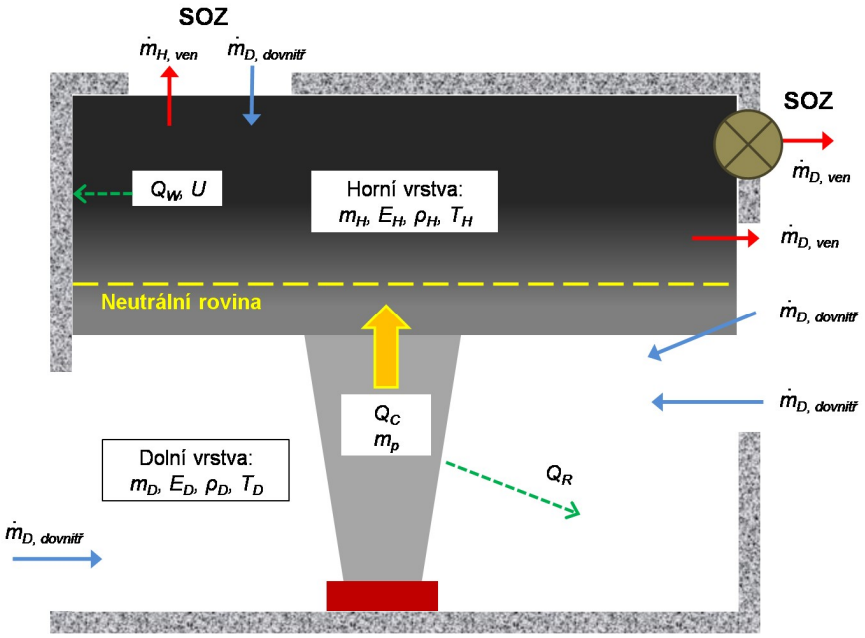
$$L_h = \left(2{,}9H\left(\dot{Q}_H\right)^{0{,}33}\right) - H \tag{31}$$

kde L_f délka plamene (m)
H výška stropu nad zdrojem požáru (m)
$\dot{Q}_H$ bezrozměrný součinitel rychlosti uvolňování tepla (-), daný vztahem:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}/(1{,}11.10^6.H^{2,5}) \tag{32}$$

5 Vrstva kouře

Vlivem vztlaku se horké zplodiny hoření shromažďují v horní části místnosti. Sloupec kouřových plynů tak vytváří *vrstvu kouře*, která se prohlubuje a klesá k podlaze. Tímto se zároveň zmenšuje vzdálenost, kterou urazí horké plyny od zdroje požáru k vrstvě kouře pod stropem.



Obr. 16 – Ukázka modelu zakouření místnosti [9]

Pro usnadnění výpočtu veličin charakterizujících vrstvu kouře se většinou uvažuje, že je vrstva dostatečně homogenní, takže je možno ji charakterizovat jedinou teplotou. Výška a teplota vrstvy závisí na toku hmoty a energie do vrstvy, na tepelných ztrátách ohraničujícími stěnami a dolní částí místnosti a na toku hmoty a konvekční energie ven z místnosti.

5.1 Popis vzniku vrstvy kouře

Sloupec kouřových plynů začíná vytvářet vrstvu, která se prohlubuje. Prohlubováním vrstvy kouřových plynů se zmenšuje vzdálenost mezi zdrojem požáru a úrovni kumulované vrstvy kouře. Změnou vertikální vzdálenosti dochází ke změně v parametrech plynů vstupujících do vrstvy kouře.

Šíření Fire Plume a vrstvy kouře v prostoru je doprovázeno přisáváním okolního chladnějšího vzduchu. K nejvýznamnějšímu přisávání vzduchu dochází při vertikálním šíření kouře a turbulentním proudění (např. obtékání stavebních konstrukcí). Přisávání vzduchu do vrstvy kouře při horizontálním proudění pod stropní konstrukcí je podstatně menší. Přisávaný okolní chladnější vzduch způsobuje zvětšení objemu kouře a změnu jeho parametrů. Dochází ke snížení teploty, rychlosti proudění, koncentrace toxických plynů a koncentrace pevných částic ve Fire Plume a následně vrstvě kouře. S narůstající vzdáleností od zdroje požáru nabývá změna parametrů kouře na významu.

Teplota kumulované vrstvy kouře je snižována především přestupem tepla do ohraničujících konstrukcí a radiací na povrchy pod touto vrstvou a na objemy, které se v nich nachází (dochází k postupnému nárůstu teploty nižší chladnější vrstvy). Dosažením teploty kouřové vrstvy 200 °C a jejím sáláním na předměty pod touto vrstvou může dojít k významnému urychlení rozvoje požáru. Uvedená teplota je současně zpravidla považována za limitní z hlediska bezpečné evakuace osob pod kouřovou vrstvou. Dosažení teploty 500 až 600 °C se považuje za okamžik výskytu efektu flashover [2], tedy celkového vznícení hořlavých látek v prostoru (viz následující kapitola).

S postupným rozvojem požáru dochází k prohlubování kumulované vrstvy kouře. Pokud je mezi zdrojovou místností a místnostmi přilehlými umístěn propojovací otvor, dojde při poklesu kumulované vrstvy plynů pod úroveň nadpraží otvoru k šíření kouře do sousední místnosti. Popsaný jev je provázen přívodem vzduchu ze sousedního prostoru spodní části otvoru. Toky plynů v otvorech se postupně mírně ustalují. Obdobným procesem dochází k šíření kouře do dalších místností propojených otvory. V případě, že je otvor uzavřen (např. dveřmi), je způsob šíření kouře podobný (infiltrace netěsnostmi v konstrukcích), avšak množství prostupujících plynů je podstatně menší.

5.2 Zásady postupů pro stanovení vrstvy kouře

Některé z vlastností vrstvy kouře lze stanovit jednoduchými metodami. Zpravidla je stanovováno rozhraní vrstev, teplota a koncentrace vrstvy kouře. Při výpočtech je předpokládána homogenní teplota a koncentrace kouře. Výpočetní metody je možné členit na situace, kdy:

- kouř není z prostoru odváděn (zařízení pro odvod kouře a tepla není instalováno nebo v provozu),
- kouř je z prostoru odváděn (zařízení pro odvod kouře a tepla je instalováno a v provozu).

Popisované parametry lze stanovit v závislosti na volbě požárního scénáře.

Prezentované metody jsou využitelné v klidných prostředích, kde proudění vzdušiny není významněji ovlivněno jinými vlivy (např. vzduchotechnickými zařízeními). Metody nezohledňují vliv stabilních hasicích zařízení, která mohou mít na vlastnosti kouře a jeho chování podstatný význam.

Pro určení kouřové vrstvy je možné uvažovat s následujícími situacemi:

- plnění prostoru kouřem bez odvodu,
- plnění prostoru kouřem s mechanickým odvodem,
- plnění prostoru kouře s přirozeným odvodem horizontálním otvorem.

6 Celkového vzplanutí

Celkové vzplanutí, neboli flashover, lze definovat jako přechod od lokálního požáru k hoření všech nechráněných hořlavých povrchů v místnosti. Flashover se posuzuje spíše jako přechod mezi dvěma stavy než jako přesně vymezená událost.

Počátečními podmínkami pro výskyt flashoveru jsou dostatek paliva a dostatečné odvětrání, aby se požár mohl rozvinout do potřebné velikosti. Rovněž musí být strop schopen zadržet spaliny a zároveň geometrie místnosti musí dovolit, aby sálavý tepelný tok horké vrstvy dosáhl takové míry, aby se všechny hořlavé povrchy v místnosti mohly v několika sekundách vznítit. Obvykle flashover nastává, jestliže dosáhne teplota horké vrstvy 500 – 600 ^{o}C nebo hustota tepelného toku na podlaze je přibližně 20 kW/m^2.

Určení rychlosti uvolňování tepla potřebné k tomu, aby došlo k celkovému vzplanutí v místnosti, je možné pomocí následujících rovnic [2], [5].

Babrauskas:

$$\dot{Q}_{FO} = 750 A_O \sqrt{h_O} \tag{33}$$

kde $\dot{Q}_{FO}$ HRR potřebná pro vznik flashoveru (kW)
A_O plocha otevřených otvorů (m^2)
h_O výška otevřených otvorů (m)

Thomas:

$$\dot{Q}_{FO} = 7{,}8 A_T + 378 A_O \sqrt{h_O} \tag{34}$$

kde A_T celková plocha ohraničujících konstrukcí místnosti (m^2)

McCaffrey, Quintiere a Harkleroad:

$$\dot{Q}_{FO} = 610 \sqrt{\lambda_k A_T A_O \sqrt{h_O}} \tag{35}$$

kde λ_k efektivní tepelná vodivost ohraničujících konstrukcí (kW·m^{-1}·K^{-1})

K výpočtu efektivní tepelné vodivosti se musí nejprve vypočítat - čas tepelné penetrace t_p (s):

$$t_p = \left(\frac{\rho c}{\lambda}\right)\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \tag{36}$$

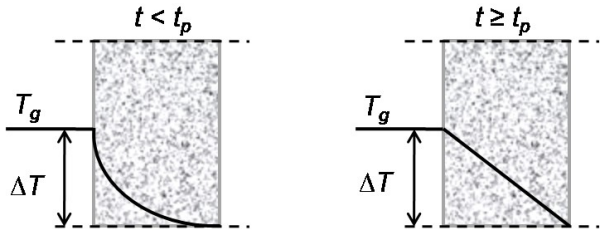
kde ρ hustota materiálu ohraničujících konstrukcí (kg·m^{-3})
c měrné teplo materiálu (J·kg^{-1}·K^{-1})
λ tepelná vodivost materiálu (W·m^{-1}·K^{-1})
δ tloušťka materiálu (m)

Pro běžné stěny z betonu nebo cihel je čas tepelné penetrace t_p řádově několik hodin.

Efektivní tepelná vodivost λ_k se vypočte po porovnání času t, ve kterém se zjišťuje hodnota $\dot{Q}_{FO}$, s časem tepelné penetrace t_p z jedné z následujících rovnic:

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{t}} \qquad \text{pro } t \leq t_p \tag{37}$$

$$\lambda_k = \frac{\lambda}{\delta} \qquad \text{pro } t > t_p \tag{38}$$



Obr. 17 – Průběh teploty ve stavební konstrukci v závislosti na t_p [9]

Z uvedených rovnic vyplývá, že pro stanovení $\dot{Q}_{FO}$ pomocí této metody se musí určit i čas, ve kterém se budou hodnoty počítat. Doporučuje se uvažovat s časem do 30 minut.

Tab. 5 – Tepelné vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	***ρ*** (kg·m^{-3})	***c*** (J·kg^{-1}·K^{-1})	***λ*** (W·m^{-1}·K^{-1})
cihly (běžné)	2000	1000	1,2
beton	2300	900	2
lehký beton	1200	960	0,48

6.1 Požáry řízené odvětráním

V běžných místnostech jsou požáry po celkovém vzplanutí obvykle řízeny množstvím dostupného kyslíku, které závisí na velikosti a tvaru otvorů umožňujících přístup vzduchu. Rychlost uvolňování tepla zůstává v této fázi přibližně konstantní.

Hmotnostní tok vzduchu do místnosti závisí na parametru odvětrání. Pro případy teplot v prostoru vyšších než 300 °C je možné hmotnostní tok stanovit pomocí zjednodušené rovnice [2]:

$$\dot{m}_a \approx 0{,}5 \cdot A_0\sqrt{H_0} \tag{39}$$

kde $\dot{m}_a$ hmotnostní tok vzduchu (kg.s^{-1})
A_0 plocha otevřených otvorů (m^2)
H_0 výška otevřených otvorů (m)

Za předpokladu, že spálením jednoho kilogramu kyslíku se vyprodukuje přibližně 13,2 MJ a že ve vzduchu je přítomno maximálně 23 % kyslíku, lze odvodit vztah pro maximální rychlost uvolňování tepla požáru řízeného odvětráním:

$$\dot{Q}_{vent} = 1{,}518 \cdot A_0\sqrt{H_0} \tag{40}$$

kde $\dot{Q}_{vent}$ max. HRR požáru řízeného odvětráním (MW)

V literatuře je často rovnice uváděna po vydělení efektivní výhřevností dřeva $\Delta H_{\mathrm{eff}} \approx 17$ MJ.kg^{-1} ve tvaru:

$$\dot{Q}_{vent} = 0{,}09 \cdot A_0\sqrt{H_0} \cdot \Delta H_{eff,dřevo} \tag{41}$$

kde $\Delta H_{eff,dřevo}$ efektivní výhřevnost dřeva (MJ.kg^{-1})

6.2 Stanovení rychlosti uvolňování tepla návrhových požárů dle Eurokódu

ČSN EN 1991-1-2 [3] nabízí více možností jak pro konkrétní účely návrhu stanovit rozvoj požáru. V normě jsou charakterizovány zjednodušené modely požáru s omezeným použitím založené na specifických fyzikálních parametrech (včetně lokálních požárů) i zdokonalené modely požáru vycházející z principu zachování hmoty a energie (jedno a dvouzónové modely, CFD modely). Rychlost uvolňování tepla slouží jako vstupní proměnná zejména pro zpřesněné modely a modely lokálních požárů.

Metoda výpočtu rychlosti uvolňování tepla je obsažena v *příloze E normy*. *Fáze rozvoje* je zde popsána pomocí *t*-kvadratické rovnice, pro *plně rozvinutou fázi* jsou k dispozici vztahy jak pro požár řízený odvětráním, tak pro požár řízený množstvím paliva.

Obr. 18 – Návrhový požár dle ČSN EN 1991-1-2 [1]

Fáze rozvoje je definována *t*-kvadratickou rovnicí, která je uváděna ve tvaru:

$$Q = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \tag{42}$$

kde Q rychlost uvolňování tepla (W)

t čas (s)

t_α doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW (s)

Parametr t_α je pro vybrané provozy udáván v níže uvedené Tab. 6, včetně maximální rychlosti uvolňování tepla produkované z jednoho m^2 požáru. Obě hodnoty jsou platné, jen

pokud je součinitel δ_{q2}, kterým se uvažuje nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu, roven jedné.

Plně rozvinutou fázi vymezuje v případě požáru řízeného množstvím paliva hodnota Q (kW) daná vztahem:

$$Q = RHR_f \cdot A_{fi} \qquad \text{(kW)} \tag{43}$$

kde A_{fi} maximální plocha požáru (m^2)

RHR_f maximální rychlost uvolňování tepla produkovaná 1 m^2 požáru řízeného palivem (kW.m^{-2})

Pro případ požáru řízeného odvětráním nabízí norma zjednodušený vztah pro výpočet maximální rychlosti uvolňování tepla:

$$Q_{max} = 0{,}10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \sqrt{h_{eq}} \tag{44}$$

kde Q_{max} maximální rychlost uvolňování tepla požáru řízeného odvětráním (MW)

m součinitel hoření (-), zpravidla m = 0,8

H_u hodnota čisté výhřevnosti dřeva (MJ.kg^{-1}),

H_u = 17,5 MJ.kg^{-1}

A_v plocha otvorů (m^2)

h_{eq} průměrná výška otvorů (m)

Tab. 6 – Rychlost rozvoje požáru a RHR_f pro různé provozy dle přílohy E ČSN EN 1991-1-2 [3]

Provoz	**Rychlost rozvoje požáru**	t_α (s)	RHR_f (kW.m^{-2})
doprava (místa pro veřejnost)	**malá**	**600**	**250**
hotelové a nemocniční pokoje	**střední**	**300**	
byty a rodinné domy			
kanceláře			
školní třídy			
nákupní centra	**velká**	**150**	
divadla (kina)			**500**
knihovny			

Pozn.: Pro případ velmi rychlého rozvoje požáru je t_α = 75 s.

V podmínkách požáru řízeného odvětráním musí být křivka rychlosti uvolňování tepla protažena tak, aby odpovídala existující energii uvolněné požárním zatížením. Pokud křivka protažena není, předpokládá se, že existuje externí hoření (vně otvorů), o které budou nižší teploty plynů v posuzovaném úseku.

Fáze dohořívání začíná po vyhoření 70 % požárního zatížení a končí jeho úplným vyhořením. Lze ji vyjádřit jako lineární pokles.

7 Teplotní křivky

Pojem *teplotní křivka*, charakterizující závislost teploty v požárním úseku, patří mezi tradiční vyjádření intenzity požáru. Nejčastěji se popisují tradiční teplotní křivky ve fázi plně rozvinutého požáru s charakteristickým rychlým nárůstem teploty. Zachycení fáze dohořívání (chladnutí) teplotní křivkou je složitější, avšak i přes pokles teplot v hořícím prostoru nemusí docházet k poklesu tepelného namáhání ve stavební konstrukci (např. tepelnou setrvačností stavební konstrukce).

7.1 Nominální teplotní křivky

Nominální teplotní křivky se obvykle používají k ověřování požární odolnosti stavebních konstrukcí.

Normová teplotní křivka

Normová teplotní křivka (tzv. celulosového typu) slouží pro stanovení požární odolnosti stavebních prvků [3], [13], [14]. Tato křivka má empirický základ, neodrážející proměnné, které ovlivňují prostředí po celkovém vzplanutí. Její aplikace v požárním inženýrství je omezena na aproximaci teploty požáru po celkovém vzplanutí. Je užitečná v případě, kdy je nutno uskutečnit porovnání s experimentálně stanovenými vlastnostmi.

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \tag{45}$$

kde Θ_g teplota plynů v požárním úseku (°C)
t čas (min)

Uhlovodíková křivka

Uhlovodíková teplotní křivka umožňuje simulaci prudkých požárů s rychlým nárůstem intenzity. Touto křivkou mohou být reprezentovány plně rozvinuté požáry hořlavých kapalin.

$$\Theta_g = 20 + 1080\,(1 - 0{,}325e^{-0{,}167t} - 0{,}675e^{-2{,}5t}) \tag{46}$$

Křivka vnějšího požáru

Křivka vnějšího požáru se používá při posuzování tepelného zatížení konstrukčních prvků (např. sloupů) vyskytujících se vně objektu. Tato teplotní křivka koresponduje s křivkou normovou až do dosažení teploty vnější konstrukce přibližně 660 °C, kdy již zůstává teplota konstantní.

$$\Theta_g = 20 + 660\,(1 - 0{,}687e^{-0{,}32t} - 0{,}313e^{-0{,}38t}) \tag{47}$$

Křivka pomalého zahřívání

Aplikace této teplotní křivky je vhodná pro specifické případy pomalu narůstajícího požáru zvláště v prvních 20 minutách [13]. Uplatňuje se například při návrhu požáru v dutinách zdvojených podlah či podhledech.

- pro $0 < t \leq 21$

$$\Theta_g = 20 + 154\sqrt[4]{t} \tag{48}$$

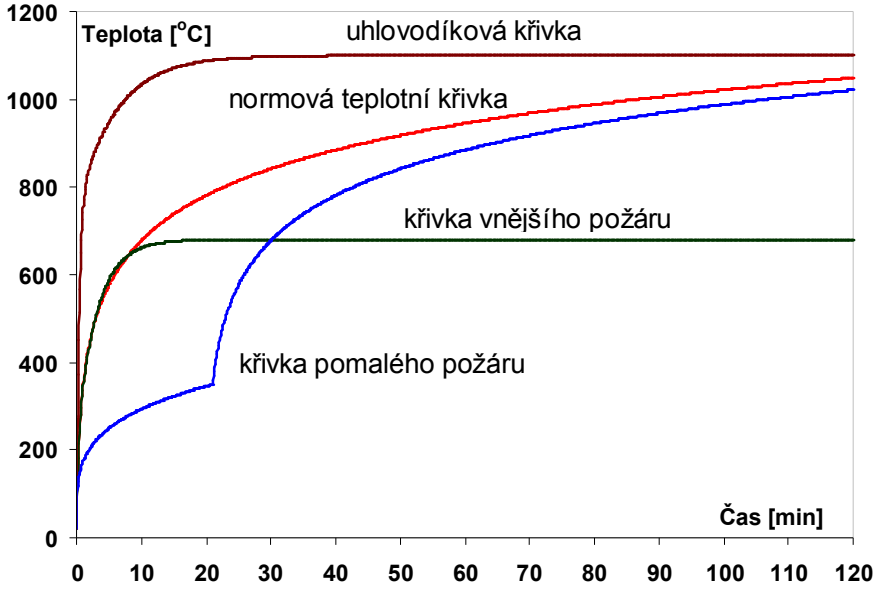
- pro t > 21 (předpokládá nárůst teploty podle nominální teplotní křivky)

$$\Theta_g = 20 + 345\log_{10}(8(t-20)+1) \tag{49}$$

Jiné teplotní křivky

Různé zkušební metody stanovují specifické teplotní křivky pro řadu účelů (např. tunelové teplotní křivky - RABT, RWS, HCM). Tyto křivky mají empirický základ a nemusejí brát v úvahu možné prostředí po celkovém vzplanutí.

Jejich aplikace v požárním inženýrství je proto omezená. Mohou být užitečné v případě, kdy je nutno učinit porovnání s vlastnostmi stanovenými při požární zkoušce.



Obr. 19 – Nominální teplotní křivky [9]

7.2 Parametrické teplotní křivky

Teplotní křivky plynu požáru řízeného odvětráním pro různé součinitele odvětrání, různé hustoty požárního zatížení a odlišné fyzikální vlastnosti konstrukcí ohraničujících požární úsek se obecně nazývají *parametrické teplotní křivky*.

Rovnice pro určení parametrických teplotních křivek vznikly na základě rovnice rovnováhy tepla. Při jejich popisu se pracuje s požárním zatížením (hustotou požárního zatížení $q_{t,d}$), s parametrem odvětrání (O) a s vlivem ztrát tepla přes ohraničující konstrukci. Navíc tyto teplotní křivky popisují ochlazovací fázi požáru. Své uplatnění si našly zejména v Eurokódech.

Tyto teplotní křivky jsou platné pouze pro požáry s požárním zatížením celulosového typu a pro relativně malé požární úseky (s velikostí do 500 m^2 podlahové plochy s maximální světlou výškou 4 m). Nelze je rovněž aplikovat u požárních úseků s vodorovnými otvory v podlahách nebo stropech (popř. střechách).

Před výkladem postupu výpočtu parametrické teplotní křivky je však nezbytné definovat požární zatížení, které se v Eurokódech [3] charakterizuje tzv. *návrhovou hustotou*. Vztah pro návrhovou hustotu požárního zatížení $q_{f,d}$ je dán

$$q_{f,d} = q_{f,k}.m.\delta_{q1}.\delta_{q2}\delta_{qn} \tag{50}$$

kde $q_{f,k}$ hustota charakteristického požárního zatížení vztažená na A_f (MJ.m^{-2})

m součinitel hoření (m = 0,8 – 1,0)

δ_{q1} součinitel vyjadřující nebezpečí vzniku požáru v závislosti na velikosti požárního úseku (tab. 8)

δ_{q2} součinitel zohledňující nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu (tab. 8)

δ_{qn} součinitel (tab. 9), kterým se do výpočtu zavádí aktivní požární ochrana (stabilní hasicí zařízení, elektrická požární signalizace, požární hlásiče a dojezd jednotek PO).

Hustoty charakteristického požárního zatížení $q_{f,k}$ na jednotku plochy lze určit z výhřevnosti všech hořlavých materiálů v požárním úseku takto

$$q_{f,k} = \sum M_{k,i}.H_{ui}.\psi_i/A \tag{51}$$

kde $M_{k,i}$ množství hořlavého materiálu (kg)

H_{ui} hodnoty čisté výhřevnosti dle EN ISO 1716 (MJ.kg^{-1})

ψ_i součinitel pro stanovení chráněného požárního zatížení (vliv uložení materiálu v požárně odolných obalech)

Pro provozy, kde je součinitel δ_{q2} = 1, jsou hustoty charakteristického požárního zatížení uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 – Hustoty požárního zatížení $q_{f,k}$ (MJ/m^2) pro běžné provozy [3]

Provoz	Průměr	80 % kvantil
byty	780	948
nemocnice (pokoje)	230	280
hotely (pokoje)	310	377
knihovny	1 500	1 824
kanceláře	420	511
školní třídy	285	347
nákupní centrum	600	730
divadla (kina)	300	365
doprava (prostory pro veřejnost)	100	122

Tab. 8 – Součinitele δ_{q1} a δ_{q2} [3]

Podlahová plocha úseku A_f [m^2]	**Nebezpečí vzniku požáru δ_{q1}**	**Nebezpečí vzniku požáru δ_{q2}**	**Příklady provozu**
25	1,10	0,78	umělecké galerie, muzea, bazény
250	1,50	1,00	kanceláře, byty, hotely, papírenství
2 500	1,90	1,22	výroba strojů a motorů
5 000	2,00	1,44	chemické laboratoře, lakovny
10 000	2,13	1,66	výroba pyrotechniky nebo barev

Pozn.: Hodnoty součinitele δ_{q1} lze v mezilehlých hodnotách lineárně interpolovat.

Tab. 9 – Součinitele δ_{qn} (aktivní protipožární opatření) [3]

samočinné hasicí zařízení		**samočinné požární hlásiče**		
samočinné vodní hasicí zařízení	nezávislé vodní zdroje 0 | 1 | 2	samočinné požární a poplachové hlásiče teplo	kouř	samočinný přenos poplachu k požární jednotce
δ_{n1}	δ_{n2}	δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}
0,61	1 | 0,87 | 0,7	0,87 nebo 0,73		0,87

manuální hašení požáru				
závodní požární jednotka	externí (veřejná) požární jednotka	bezpečné přístupové cesty	technické hasicí prostředky	zařízení pro odvod kouře
δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61 nebo 0,78		0,9 nebo 1,0 nebo 1,5	1,0 nebo 1,5	1,0 nebo 1,5

Obr. 20 – Schéma průběhu běžné parametrické teplotní křivky [9]

Parametrická teplotní křivka pro *fázi rozvoje požáru* je dána:

$$\Theta_g = 1325\left(1 - 0{,}324e^{-0{,}2t^*} - 0{,}204e^{-1{,}7t^*} - 0{,}472e^{-19t^*}\right) + 20 \tag{52}$$

kde t^*je náhradní čas zohledňující vliv otvorů a charakter ohraničující konstrukce. Je určen:

$$t^* = t\,\Gamma \tag{53}$$

kde pomocný součinitel Γ je charakterizován

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0{,}04/1160)^2} \tag{54}$$

kde O koeficient otvorů ($m^{0,5}$) určený poměrem $A_v\sqrt{h_{eq}}/A_t$

A_v celková plocha svislých otvorů (m^2)

h_{eq} vážený průměr šířky okenních otvorů (m)

A_t celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek včetně otvorů (m^2)

b koeficient povrchů ($J.m^{-2}.s^{-0,5}.K^{-1}$) vyjádřený

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \tag{55}$$

kde ρ hustota ($kg.m^{-3}$)

c měrné teplo ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

λ tepelná vodivost ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

Tab. 10 – Vybrané fyzikální vlastnosti povrchových konstrukcí při teplotě 20 °C [15]

Materiál	**Hustota ρ** (kg.m^{-3})	**Měrné teplo *c*** (J.kg^{-1}.K^{-1})	**Tepelná vodivost λ** (W.m^{-1}.K^{-1})
beton	2 300	900	2,0
lehký beton	1 600	840	0,8
železobeton	2 300	840	1,57
plné cihly	2 000	1 000	1,2
děrované cihly	700	840	0,15
lehčené cihly	1 600	840	0,7
plynosilikátové tvárnice	550	840	0,14
sádrokarton	900	1 000	0,25
dřevo (měkké)	450	1 113	0,1
dřevo (tvrdé)	720	1 880	0,2
dřevotříska	600	2 510	0,11
pěnový polystyren	30	1 550	0,041
rohože z minerální vlny	60	1 030	0,037
vzduch	1,1	1 040	0,026
ocel	7 850	600	45

Při různých součinitelích *b* pro stěny, strop a podlahu lze součinitel indexovat na $b_j = \sqrt{\rho c \lambda}$, pak platí

$$b = \frac{\sum(b_j A_j)}{A_t - A_v} \tag{56}$$

kde b_j tepelná charakteristika povrchu j-té ohraničující konstrukce (m)

A_j plocha j-té ohraničující konstrukce (m^2)

Doba dosažení nejvyšší teploty v době t_{max} (resp. t^*_{max})

$$t_{max} = \max \begin{bmatrix} 0{,}2.\,10^{-3} q_{t,d}/O & \textit{požár řízený odvětráním} \\ \textit{nebo} & \\ t_{lim} & \textit{požár řízený palivem} \end{bmatrix} \tag{57}$$

kde $q_{t,d}$ návrhová hustota požárního zatížení (MJ.m^{-2}) vztažená na plochu povrchů A_t se stanoví

$$q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t \tag{58}$$

$q_{f,d}$ návrhová hustota požárního zatížení vztažená na podlahovou plochu A_f (MJ.m^{-2})

A_f plocha podlahy (m^2)

A_t celková plocha konstrukcí včetně otvorů (m^2)

t_{lim} doba (h) dosažení nejvyšší teploty při požáru řízeném palivem

t_{lim} = 25 min (doprava, veřejné prostory)

t_{lim} = 20 min (byty, nemocnice, hotely, kanceláře, školy)

t_{lim} = 15 min (knihovny, nákupní centra, divadla)

Je-li $t_{max} = t_{lim}$, pak náhradní čas t^* je definováno jako $t^* = t.\,\Gamma_{\text{lim}}$, kdy platí

$$\Gamma_{lim} = \frac{\left(0{,}1.10^{-3} q_{t,d}/b t_{lim}\right)^2}{(0{,}04/1160)^2} \tag{59}$$

V případě dosažení níže uvedených parametrů se hodnota součinitele Γ_{lim} upravuje součinem $k.\Gamma_{\text{lim}}$:

$O > 0{,}04\ \text{m}^{0,5}$,

$q_{t,d} < 75\ \text{MJ.m}^{-2}$,

$b < 1160$.

Korekce k je pak dána:

$$k = 1 + \left(\frac{O-0{,}04}{0{,}04}\right)\left(\frac{q_{t,d}-75}{75}\right)\left(\frac{1160-b}{1160}\right) \tag{60}$$

Stanovení náhradního času t^*_{max} (h), při kterém je dosaženo nejvyšší teploty

$$t^*_{max} = t_{max}\Gamma \tag{61}$$

Fáze chladnutí je ovlivněna náhradním časem t^*_{max} (h):

pro $t^*_{max} \leq 0{,}5$ h

$$\Theta_g = \Theta_{g,max} - 625\,(t^* - t^*_{max}.x) \tag{62a}$$

pro 0,5 h ≤ $t^*_{\text{max}} \leq 2{,}0$ h

$$\Theta_g = \Theta_{g,max} - 250\,(3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max}.x) \tag{62b}$$

pro $t^*_{\text{max}} > 2{,}0$ h

$$\Theta_g = \Theta_{g,max} - 250\,(t^* - t^*_{max}.x) \tag{62c}$$

kde $\Theta_{g,max}$ je maximální dosažená teplota (°C) dosažena v t^*_{max}.

je- li $t_{\text{max}} > t_{\text{lim}}$ → $x = 1$

$t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$ → $x = t_{\text{lim}}\Gamma / t^*_{\text{max}}$

Omezení platnosti parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 je následující:

- koeficientu otvorů $0{,}02 \leq O \leq 0{,}20\ \text{m}^{0,5}$
- návrhové hustoty požárního zatížení $50 \leq q_{t,d} \leq 1000\ \text{MJ.m}^{-2}$
- koeficientu povrchů $100 \leq b \leq 2200\ \text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-0,5}.\text{K}^{-1}$

Použitá literatura

[1] KUČERA, P. – PAVLÍK, T. – POKORNÝ, J. – KAISER, R. *Požární inženýrství – dynamika požáru*. Edice SPEKTRUM, sv. 65. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. s. 152. ISBN 978-80-7385-074-6.

[2] KARLSSON, B. – QUINTIERE, J.G. *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton, USA : CRC Press. pp. 336, 1999. ISBN 0-8493-1300-7.

[3] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí -Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru.* Praha : Český normalizační institut, 2004.

[4] KUČERA, P., KAISER, R. *Úvod do požárního inženýrství*. SPBI, Ostrava, 2007. ISBN: 978-80-7385-024-1.

[5] *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ed. P.J. DiNenno), 3rd Edition, National Fire Protection Association, Quincy USA, 2002.

[6] ČSN 73 0824: *Požární bezpečnost staveb – Výhřevnost hořlavých látek*, Praha, 1993.

[7] ISO/TS 16733: *Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires*. Geneva: ISO, 2006.

[8] KUČERA, P. – PAVLÍK, T. – POKORNÝ, J. *Požární inženýrství – Aktivní prvky požární ochrany*. Edice SPEKTRUM, sv. 84. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2013. s. 112. ISBN 978-80-7385-136-1.

[9] KUČERA, P. et al. *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany*. Edice SPEKTRUM, sv. 56. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. s. 201. ISBN 978-80-7385-044-9.

[10] ISO 16734: *Fire safety engineering -- Requirements governing algebraic equations - Fire plumes*. Geneva: ISO, 2006.

[11] ISO 16736: *Fire safety engineering – Requirements governing algebraic formulas - Ceiling jet flows*. Geneva: ISO, 2006.

[12] HESKESTEAD, G. Fire Plume, Flame height and Air Entrainment. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd Edition, Section 2, Chapter 1. Quincy, National Fire Protection Association, 2002, s. 1-17. ISBN 978-0-87765-451-3.

[13] ČSN EN 1363-1: *Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2013.

[14] ČSN EN 1363-2: *Zkoušení požární odolnosti – Část 2: Alternativní a doplňkové postupy*. Praha: ČNI, 2000.

[15] BUCHANAN, A.H. *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2003. ISBN 0-4718-9060-8.