

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Doktorský studijní program: **STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ**

Studijní obor: **Pozemní stavby**

Ing. Marek Pokorný

INSTALAČNÍ ŠACHTY Z POŽÁRNÍHO HLEDISKA

PLUMBING SHAFTS AND THEIR FIRE SAFETY

DISERTAČNÍ PRÁCE K ZÍSKÁNÍ AKADEMICKÉHO TITULU Ph.D.

Školitel: **doc. Ing. Václav Kupilík, CSc.**

Praha, únor 2012

© Marek Pokorný, 2012

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být kopírována ani reprodukována v jakékoliv formě bez písemného souhlasu vlastníka autorských práv.

Kontaktní e-mailová adresa: marek.pokorny@fsv.cvut.cz

Pro citaci této disertační práce použijte následující odkaz:

Pokorný, M. (2012). Instalační šachty z požárního hlediska. Disertační práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze – Fakulta stavební.

Abstrakt

Disertační práce v úvodní části analyzuje rizika vertikálního šíření požáru instalačními šachtami a hodnotí konstrukční a technické řešení těchto specifických prostor z hlediska pasivní a aktivní požární ochrany. Dále se práce zaměřuje na soudobé požárněinženýrské možnosti využívající výpočetní techniku pro simulace (matematické modelování) účinků požáru v uzavřeném prostoru. Tyto progresivní výpočetní nástroje se dostávají stále častěji z oblasti výzkumu a vývoje do oblasti projekční sféry a s výhodou umožňují odborně zdatným uživatelům navrhovat budovy nebo jejich části efektivněji a bezpečněji. Jsou to však opět uživatelé, kteří se tímto postupem mohou snadno dopustit i řádových výpočetních chyb a nepřesností. Hlavním cílem experimentální části disertační práce jsou právě počítačové simulace účinků řízeného požáru uvnitř šachtového prostoru, které však nezůstávají pouze na teoretické úrovni, ale jsou konfrontovány s požárním experimentem. Je vytvořen zjednodušený model šachty vycházející z konstrukčního řešení průběžné a členěné instalační šachty. V laboratorním modelu šachty jsou měřeny základní požárnětechnické veličiny – teplota, rychlost proudění vzduchu, dopadající tepelný tok a jsou sledovány doprovodné jevy – šíření plamene po náhradním hořlavém povrchu šachtových stěn a riziko přeskočení plamene nad stropní přepážku v členěné šachtě. Pro stejné okrajové podmínky je vytvořen i matematický model šachty v nejnovější již šesté testovací verzi programu FDS 6 (Fire Dynamics Simulator) postavené na algoritmech výpočtového proudění tekutin (CFD). Laboratorně zjištěné výsledky jsou následně konfrontovány s predikcí získanou na základě počítačové simulace. Disertační práce dále analyzuje dílčí experiment s problematikou hořlavých bytových jader a šachet ve stávající panelové výstavbě z druhé poloviny 20. století. V rámci rekonstrukcí bytových jader byly odebrány různé vzorky stěnových panelů (příček) použitých pro opláštění instalačních šachet, které byly v laboratoři následně vysokoteplotně testovány v konickém kalorimetru. K dispozici jsou tak požárnětechnické charakteristiky, které jinak nejsou v odborné literatuře dostupné. Závěr práce pro uživatele a autory softwaru FDS shrnuje poznatky získané v průběhu provedených požárních experimentů a dále pro stavební praxi uvádí konstrukční chyby a doporučení z hlediska požární bezpečnosti instalačních šachet.

Klíčová slova

Šachta, požární most, ucpávka, bytové jádro, komínový efekt, přenos tepla, rychlost proudění, modelování, CFD, Fire Dynamics Simulator (FDS), šíření plamene, zplodiny hoření

Abstract

In its introductory part, the dissertation thesis analyses the risks of the vertical spread of fires through plumbing shafts and assesses the structural and technical design of these specific facilities in terms of passive and active fire safety. The thesis further focuses on the present-day fire engineering state of the art applying computing technology for the simulations (mathematical modelling) of fire effects in enclosed spaces. These progressive computational tools are ever more often introduced into the design sphere from research and development empowering professionally competent users to expediently design buildings or their components with enhanced efficiency and safety. It is, however, the users applying these very procedures in the first place who may easily make computational errors and inaccuracies amounting up to one order of magnitude. The core of the experimental part of the thesis, therefore, are computer simulations of the effects of a controlled fire spreading inside a shaft space which, however, are studied not only theoretically, but are confronted with the fire experiment. A simplified model of a shaft is created based on the structural design of a continuous and a separated plumbing shaft. The laboratory shaft model serves for the measurement of the basic fire technical variables – the temperature, air flow velocity, incident heat flux, and for the monitoring of accompanying phenomena – the flame spread along a substitute flammable surface of shaft walls and the risks of flame flashover over the ceiling barrier in a separated shaft. Using the same boundary conditions a mathematical shaft model has also been created in the latest, already sixth testing version of the FDS 6 (Fire Dynamics Simulator) programme built up using the computational fluid dynamics (CFD) algorithms. The laboratory results are subsequently confronted with the computer simulation-based prediction. The dissertation thesis also analyses a partial experiment addressing the issue of flammable utility cores and shafts in the existing prefabricated housing development from the second half of the 20th century. Different specimens of wall panels (partitions) used for the sheathing of plumbing shafts were sampled as part of the utility core reconstruction project to be successively subjected to laboratory testing at high temperatures in the cone calorimeter. In this way, fire technical characteristics which are otherwise not commonly available in professional literature were obtained. To conclude, the thesis sums up the findings obtained during the completed fire experiments that are vital for the users and the authors of the FDS software, and also lists common structural defects and recommendations related to the fire safety of plumbing shafts relevant for the construction practice.

Keywords

Shaft, fire bridge, fire sealing, utility core, chimney effect, heat transfer, flow velocity, modelling, CFD, Fire Dynamics Simulator (FDS), flame spread, combustion products

Předmluva

Rád bych na tomto místě zmínil několik důležitých lidí a institucí, poděkoval jim a projevil upřímnou vděčnost za jejich podporu během mého doktorského studia.

V mém osobním životě jsou to mí vážení rodiče, morální vzor, paní Jarmila Macháčová a pan Ladislav Pokorný, kteří mi vytvořili domov a zázemí pro studium zejména v jeho počátcích. Má partnerka, slečna Petra Kubíková, mi poskytla svou úžasnou podporu, trpělivost, klid, současný domov a za to jí patří mé nejhlubší uznání.

V mém profesním životě je to především můj školitel, kolega a přítel, vážený pan docent Václav Kupilík, který byl mým odborným průvodcem v oblasti požární bezpečnosti staveb a tím kdo ochotně vždy pomohl a poradil. Dále bych zmínil své kolegy a přátele z fakulty, kteří mě svým osobitým a pozitivním způsobem ovlivnili a posunuli vpřed. Jsou jimi především: Petr Slanina, Kristina Kateřina Fořtová, Petra Tichá, Jiří Pazderka, Stanislava Neubergová, Petr Zahradník, Petr Jaroš, Roman Jiráček, Soňa Štolbová, Petra Hrušková, Richard Hlaváč, Veronika Kačmaříková, Jakub Kalináč a další. Podporu a důvěru jsem vždy získal u minulého i současného vedení Katedry konstrukcí pozemních staveb, zejména profesorů Jiřího Witzanyho a Petra Hájka. Technickou podporou mi na fakultě s velkou ochotou poskytli kolegové z jiných kateder, doktor Anton Trník a doktor Michal Kuráž. Loajální přístup a technickou podporu pro experimenty mi poskytla požárnětechnická laboratoř v CSI a.s., jmenovitě pan Vít Slaboch.

Důležitou etapou mého doktorského studia byla půlroční zahraniční stáž v Norsku, kterou finančně podpořily norské fondy, konkrétně organizace Research Council of Norway. Vysoce profesionální a přátelské zázemí mi během stáže poskytla Katedra inženýrství na Stord-Haugesund University College (HSH). Zde bych zmínil především svého školitele, odborníka na požární inženýrství a přítele, kterým je doktor Bjarne Paulsen Husted. Dále jsou to pan Arjen Kraaijeveld, vedoucí požární laboratoře a současná paní děkanka Monika Metallinou Log, svého času vedoucí katedry.

Závěrem jako autor prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a vyznačil v ní všechny použité prameny.

V Praze dne 27. února 2012

Marek Pokorný

Acknowledgements

The experimental part of this thesis received support from the Research Council of Norway, and scientific, technical and material support from the Department of Engineering at Stord Haugesund University College (HSH) in Norway. I would like to express my sincere thankfulness to these institutions.

Mr Bjarne Paulsen Husted Ph.D., nowadays my good friend, supervised my fire research during my six-month stay at HSH in Haugesund in 2009/10. I am very grateful to him for the great opportunity to study at the college, for all his kind guidance and continuing cooperation on my thesis. He has given me encouragement to my following research. I would also like to thank Mr Arjen Kraaijeveld for his long-term professional technical support in the university fire laboratory in Haugesund and Dean Monika Metallinou Log.

Prague, 27th February, 2012

Marek Pokorný

Obsah

Abstrakt	III
Abstract	IV
Předmluva	V
Acknowledgements	VI
Obsah	VII
Seznam použitých symbolů a zkratk	XI
Kapitola 1: Úvod	1
1.1 Motivace pro disertační práci	2
1.2 Cíle	3
1.3 Struktura	4
Kapitola 2: Současný stav problematiky	6
2.1 Úvod do problematiky instalačních šachet	7
2.1.1 Tragické požáry šířící se šachtami	7
2.1.2 Druhy šachet v budovách a rizika vertikálního šíření požáru	8
2.2 Dynamika požáru v uzavřeném prostoru	9
2.2.1 Charakteristický rozvoj požáru	9
2.2.2 Toxicita zplodin hoření a polymery	12
2.2.2.1 Základní vlastnosti a pohyb kouře	12
2.2.2.2 Polymery	13
2.2.2.3 Retardace polymerů	15
2.2.2.4 Principy toxikologie hoření polymerů	16
2.2.3 Přenos tepla v podmínkách požáru	16
2.2.3.1 Vedení tepla – kondukce	17
2.2.3.2 Proudění tepla – konvekce	18
2.2.3.3 Sálání tepla – radiace	19
2.3 Související požárnětechnická terminologie	20
2.3.1 Hořlavost výrobků – třídy reakce na oheň	20
2.3.2 Požární riziko a stupeň požární bezpečnosti	21
2.3.3 Druh konstrukční části a požární odolnost	22
2.4 Pasivní a aktivní požární ochrana instalačních šachet	24
2.4.1 Konstrukční řešení instalačních šachet	25
2.4.2 Těsnění instalačních prostupů v požárně dělicích konstrukcích	26
2.4.2.1 Požární most	26
2.4.2.2 Legislativní požadavky pro těsnění instalačních prostupů	27
2.4.2.3 Požární ucpávky – systémová těsnění instalačních prostupů	28
2.4.2.4 Měkké ucpávky a sdružené prostupy	29
2.4.2.5 Tvrdé ucpávky	30

2.4.2.6	Rozebíratelné ucpávky	30
2.4.2.7	Speciální ucpávky	31
2.4.3	Vzduchotěsnost požárních ucpávek v pasivních domech	32
2.4.4	Šachtové stěny s požární odolností	33
2.4.5	Požární uzávěry v šachtových stěnách	34
2.4.6	Aktivní požární ochrana pro šachtové prostory	36
2.4.6.1	Vysokotlaká vodní mlha	37
2.4.6.2	Hasicí aerosol	38
2.5	Modelování požáru v uzavřeném prostoru	39
2.5.1	Rozdělení matematických modelů požáru	40
2.5.2	Zónové modely	41
2.5.3	Modely typu pole (CFD)	43
2.5.4	Zjednodušené výpočtové modely a komínový efekt	44
2.5.5	Fire Dynamics Simulator (FDS)	46
Kapitola 3: Experiment 1 – Laboratorní vs. matematický CFD model šachty		49
3.1	Úvod	50
3.1.1	Cíle experimentální části	51
3.1.2	Rozfázování a zdůvodnění experimentu	51
3.2	Laboratorní model	52
3.2.1	Popis laboratorního modelu	52
3.2.2	Řízený zdroj požáru – plynový hořák	52
3.2.3	Průběžná šachta s nehořlavým opláštěním (Fáze 1)	53
3.2.4	Průběžná šachta s částečným hořlavým opláštěním (Fáze 2)	54
3.2.5	Členěná šachta s nehořlavým opláštěním (Fáze 3)	55
3.3	Měřicí zařízení a okrajové podmínky měření	56
3.3.1	Měření teplot	58
3.3.2	Měření tepelného toku	58
3.3.3	Měření rychlosti proudění	59
3.3.4	Specifikace použitých měřicích zařízení	61
3.3.5	Okrajové podmínky měření	62
3.4	Průběh laboratorních zkoušek	63
3.5	Popis matematického CFD modelu šachty	64
3.5.1	Použitý software	64
3.5.2	Tepelnětechnická charakteristika použitých materiálů	64
3.5.3	Požárnětechnická charakteristika desek z PMMA	65
3.5.4	Výpočetní síť	66
3.5.5	Simulace hořáku, turbulence a radiace	68

3.6	Porovnání výsledků laboratorního a matematického CFD modelu	69
3.6.1	Porovnání výsledků pro průběžnou šachtu s nehořlavým opláštěním (Fáze 1)	69
3.6.1.1	Porovnání teplot	69
3.6.1.2	Porovnání tepelného toku	73
3.6.1.3	Porovnání rychlosti proudění vzduchu	74
3.6.1.4	Závěr (Fáze 1)	75
3.6.2	Porovnání výsledků pro průběžnou šachtu s částečným hořlavým opláštěním (Fáze 2)	75
3.6.2.1	Hořlavá přední stěna (Fáze 2 – varianta A)	76
3.6.2.2	Hořlavá přední a boční stěna (Fáze 2 – varianta B)	78
3.6.2.3	Závěr (Fáze 2)	81
3.6.3	Porovnání výsledků pro členěnou šachtu s nehořlavým opláštěním (Fáze 3)	82
3.6.3.1	Numerické porovnání	82
3.6.3.2	Vizuální porovnání	84
3.6.3.3	Závěr (Fáze 3)	86
3.7	Nejistoty měření a počítačové simulace	86
Kapitola 4: Experiment 2 – Kalorimetrické zkoušky bytových jader panelových domů ..		88
4.1	Úvod	89
4.2	Instalační šachty v panelové bytové výstavbě	89
4.2.1	Bytová jádra s instalační šachtou	90
4.2.2	Elektroinstalační šachty v únikových cestách	94
4.3	Analýza vzorků bytových jader v kónickém kalorimetru	95
4.3.1	Popis vzorků	95
4.3.2	Metoda měření – kónický kalorimetr	96
4.3.3	Výsledky kónické kalorimetrie	97
4.4	Závěr	99
Kapitola 5: Závěry a doporučení		100
5.1	Závěry pro konstrukční řešení instalačních šachet	101
5.2	Závěry pro experimentální část	103
5.2.1	Šachtový experiment	103
5.2.2	Kalorimetrické zkoušky bytových jader	105
5.3	Náměty pro další práci	106
Literatura		107

Publikační činnost autora	110
Příloha 1: Bytová jádra lehké prefabrikace – data z kónického kalorimetru	112
Vzorek A	113
Vzorek B	114
Vzorek C	115
Vzorek D	116
Vzorek E	117
Příloha 2: Termogravimetrická analýza (TGA) pro polymetylmetakrylát (PMMA – plexisklo)	118
Příloha 3: Příklady vstupních souborů pro software FDS6 použitých v rámci Experimentu 1	119
Příloha 4: Fáze 3 – členěná šachta – porovnání teplot a tepelného toku	122

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Plocha	m^2
c	Měrná tepelná kapacita	$J/kg/K$
c_p	Měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku	$J/kg/K$
C	Sutherlandova konstanta	-
D	Vnitřní průměr rychlostní sondy	m
D	Vnější průměr potrubí	m
D^*	Charakteristický průměr požáru	m
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
H	Výhřevnost	J/kg
H	Výška	m
H_n	Výška od dna šachty k neutrální rovině	m
HRR	Rychlost uvolněného tepla „Heat Release Rate“	W
HRRPUA	Rychlost uvolněného tepla z jednotky plochy „Heat Release Rate Per Unit Area“	W/m^2
k	Kalibrační konstanta pro měřicí zařízení – rovnice (3.1) a (3.6)	
K_p	Korekční faktor	-
KČ	Kyslíkové číslo	%
p_v	Požární výpočtové zatížení	kg/m^2
p_{atm}	Absolutní atmosférický tlak	Pa
$\dot{q}$	Tepelný tok	W
$\dot{Q}$	Rychlost uvolňování tepla	W
$\dot{q}''$	Hustota tepelného toku	W/m^2
$\dot{q}''$	Hustota tepelného toku sdílená kondukcí	W/m^2
$\dot{q}''_c$	Hustota tepelného toku sdílená konvekcí	W/m^2
$\dot{q}''_r$	Hustota tepelného toku sdílená radiací	W/m^2
r_p	Referenční rychlost	$1/s$
R	Plynová konstanta vzduchu	$J/kg/K$
Re	Reynoldsovo číslo	-
T	Teplota	$K (^{\circ}C; ^{\circ}R)$
T_o	Referenční teplota – konstanta pro standardní vzduch	$^{\circ}R$

T_r	Referenční teplota v rámci TGA	°C
T_s	Teplota struktury pevného povrchu	K
T_ξ	Teplota vzduchu v šachtě	K
T_v	Teplota vnějšího (venkovního) vzduchu	K
∇T ; grad T	Teplotní gradient	K/m
THR	Celkové uvolněné teplo „Total Heat Release“	J/m ²
u	Rychlost proudění	m/s
U	Elektrické napětí	V
z	Vzdálenost od neutrální roviny	m

Řecké symboly

α	Konvektivní součinitel přestupu tepla	W/m ² /K
δ_x	Velikost kontrolního objemu	mm
Δp	Rozdíl tlaků	Pa
ε	Emisivita	-
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/m/K
μ	Dynamická viskozita vzduchu	centipoise; kg/m/s
μ_o	Referenční viskozita vzduchu při referenční teplotě T_o	centipoise
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³
ρ_∞	Hustota okolního vzduchu za konstantního tlaku	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/m ² /K ⁴
$\varnothing$	Průměr	m
ϕ	Polohový faktor	-

Zkratky pro použitá slovní spojení

A1, A2, B, C, D, E, F	Třída reakce na oheň
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO, CO ₂	Oxid uhelnatý, oxid uhličitý
DNS	Direct Numerical Simulation
DP1, DP2, DP3	Druh konstrukční části
EPS	Elektrická požární signalizace
FDS	Fire Dynamics Simulator – software

(fds)	Simulovaná hodnota v softwaru FDS
(lab)	Laboratorně měřená hodnota
LES	Large Eddy Simulation
NP	Nadzemní podlaží
PMMA	Polymethylmetakrylát (plexisklo)
PVC	Polyvinylchlorid
PHZ, DHZ, MHZ, RHZ, FHZ, GHZ, WHZ, AHZ	Hasicí zařízení (HZ) – polostabilní (P), doplňkové (D), mlhové (M), sprejové (R), pěnové (F), plynové (G), práškové (W), aerosolové (A)
PÚ	Požární úsek
R, E, I, W, C, S	Mezní stavy požární odolnosti
SPB	Stupeň požární bezpečnosti
SHZ	Stabilní hasicí zařízení
SMV	Smokeview – software
T, R, A	Termočlánek, radiometr, anemometr
TGA	Termo-gravimetrická analýza
VZT	Vzduchotechnika, vzduchotechnický
ZOKT	Zařízení na odvod kouře a tepla

Kapitola 1:

Úvod

1.1 Motivace pro disertační práci

Oheň pod kontrolou člověku odjakživa dobře slouží, avšak vymkne-li se kontrole, může vzniklý požár způsobit nenahraditelné škody. Historie byla mnohdy svědkem událostí, kdy požár jednoho domu způsobil díky absenci základních požárních opatření požár okolní zástavby či celých čtvrtí. Důkazem mohou být názvy domů, ulic či měst, které nám dodnes připomínají různé tragické události. Příkladem může být Spálený Mlýn v obci Malá Úpa v Krkonoších, Spálená ulice v Praze či Spálené Poříčí v jihovýchodních Čechách. Výjimkou není ani současná doba, kdy jsou budovány stavební objekty stále vyšší, rozsáhlejší a komplexnější. Vyšší však bývá i podíl hořlavých hmot na bázi polymerů, a to jak ve struktuře konstrukčního systému budovy, tak v interiérovém vybavení. Jako příklad mohou být uvedena rozlehlá obchodní centra, výškové administrativní budovy, velkokapacitní sportovní stavby nebo shromažďovací prostory. ***Zatímco historie poukazuje především na dvojici oheň a konstrukční dřevo ve stavbách jako na dominantní požární riziko, pak v současné době nelze opomenout toxicitu a agresivitu zplodin hoření*** (zejména u plastů), které jsou již v prvotních fázích nerozvinutého požáru schopné ohrozit živý organismus i v místech značně vzdálených od ohniska požáru. Následný rozvoj požáru a vysoké teploty atakují především stavební konstrukce a ohrožují jejich stabilitu a požárně dělicí funkci.

Instalační šachty ve stavebních objektech jsou prostory komínového charakteru pro vertikální rozvody technických zařízení (kanalizace, vodovod, vzduchotechnika, vytápění, plynovod elektroinstalace apod.), které jsou dnes většinou z plastů. ***Na malé půdorysné ploše se tak nachází vysoké požární zatížení, a chybné konstrukční řešení šachet může ohrozit mnoho podlaží v objektu včetně konstrukce střechy.*** Požárněodolná opláštění šachet a spolehlivé požární utěsnění prostupujících instalací v patřičných místech hrají rozhodující roli z hlediska případného šíření účinků požáru komínovým efektem. ***Specifické a problematické zároveň jsou stávající bytové a elektroinstalační šachty ve velkoplošné výstavbě panelových bytových domů*** z druhé poloviny 20. století, které byly koncepčně budovány nejen na území tehdejšího Československa, ale v podstatě na celém území bývalého východního bloku. Bytová jádra v systémech lehké prefabrikace představují požární riziko z hlediska vlastní vysoké hořlavosti a přímé návaznosti na instalační šachtu. Betonové stropní přepážky v šachtě jsou navíc často poškozeny v průběhu výměny vnitřních instalací, při kterých rovněž často dochází k výměně stávajících nehořlavých rozvodů (litinových, ocelových) za rozvody plastové. Elektroinstalační šachty jsou požárněrizikové zejména kvůli netěsnému plechovému opláštění, stávajícím elektrorozvodům s hliníkovými vodiči náchylnými ke zkratu a přímé návaznosti šachty na schodiště, které bývá téměř vždy jedinou únikovou možností z domu.

Požární bezpečnost staveb stojí od projekčního záměru dané stavby přes její realizaci až po vlastní užívání před důležitým úkolem, a to minimalizovat riziko vzniku a šíření požáru a v případě jeho vzniku zajistit maximálně možnou ochranu zdraví osob a zvířat, kulturních hodnot, movitého majetku a životního prostředí. Požární předpisy procházely svým historickým vývojem a rovněž současná doba je charakteristická celou řadou důležitých legislativních změn a inovací. Dochází tak například k harmonizaci českých a evropských projekčních a zkušebních norem, k aktualizaci kodexu českých požárních norem či k tvorbě legislativy zcela nové. Již zmíněná ***odvážnost a komplexnost projektů soudobých staveb s sebou stále častěji přináší požadavky na specifický požárněinženýrský přístup***, s jehož využitím lze projektovat budovy

efektivněji ve srovnání s projekty řešenými „pouze a jen“ konzervativním normovým postupem nebo na základě intuice. Požárněinženýrský přístup spočívá především ve využití stále výkonnější výpočetní techniky a dostupnějšího softwaru pro **matematické ztvárnění – modelování účinků požáru v uzavřeném prostoru budov**. Tento „odchylný“ postup začíná nacházet zázemí v českých technických normách, průběžně je v českém jazyce vydávána nová odborná literatura a důležitou podporu nachází i u Hasičského záchranného sboru České republiky jakožto orgánu státního požárního dozoru.

Softwarový nástroj pro matematické modelování (simulace) jakýchkoliv jevů lze s notnou dávkou fantazie připodobnit ke štětcí v rukou Mistra Leonarda da Vinci. Nebyl to však Mistrův štětec, který namaloval tak obdivuhodné světoznámé obrazy a kresby. Stejně tak moderní softwarové prostředí v rukou svého uživatele je pouze nástrojem a modelování reality je záležitostí konkrétních lidí, jejich znalostí a dostatku spolehlivých vstupních dat. Výsledky tak mohou být značně individuální, stejně jako napodobeniny reálného obrazu Mony Lisy (Obr. 1.1). Je stále nezbytné mít na paměti, že **počítačovou simulaci neprovádí software, ale jeho uživatel**.



Obr. 1.1 Mona Lisa a její napodobeniny – přirovnání k softwarovému modelování reálných jevů

V rámci této disertační práce je zaměřena pozornost na jeden konkrétní softwarový nástroj pro simulace účinků požáru – FDS (Fire Dynamics Simulator). Jedná se o profesionálně dlouhodobě vyvíjenou, vysoce propracovanou a snadno dostupnou aplikaci postavenou na technologii výpočtového proudění tekutin (CFD), která se stále častěji dostává z oblasti výzkumu do požárněinženýrské praxe (projekce, rekonstrukce závažných požárů, zjišťování příčin požárů apod.) a která se těší stále širší uživatelské základně. S vysokou komplexností softwaru FDS souvisí však i jeho značná uživatelská náročnost, která tak může být snadno příčinou velice nezdařilé „napodobeniny“ potencionálního požárního scénáře.

Hlavní motivací pro disertační práci je propojení stavebně konstrukčního hlediska s požárněinženýrským přístupem v oblasti šíření účinků požáru instalačními šachtami a upozornění na problematika úskalí při používání počítačových požárních simulací.

1.2 Cíle

Hlavní cíle pro disertační práci lze shrnout do následujících pěti bodů:

- 1) Analýza rizik šachtových požárů a jejich charakteristický průběh.
- 2) Popis konstrukčního řešení instalačních šachet z hlediska pasivní a aktivní požární ochrany s důrazem na časté chyby ve stavební praxi; definice technického pojmu „požární most“.

- 3) Popis možností modelování požáru v uzavřeném prostoru se zřetelem na prostory šachtového charakteru.
- 4) Předání zkušeností autorům (tvůrcům) a uživatelům softwaru FDS s různými numerickými simulacemi, které nezůstávají pouze na teoretické úrovni, ale jsou konfrontovány s požárním experimentem šachtového prostoru. Pro tento záměr byly stanoveny následující tři dílčí cíle:
 - Realizace zjednodušeného laboratorního modelu šachty pro možnost sledování základních požárnětechnických parametrů, jako jsou teploty, rychlost proudění vzduchu, tepelný tok, šíření plamene po povrchu hořlavých materiálů nebo chování kouřové vrstvy.
 - Realizace matematického (CFD) modelu šachty s využitím softwaru FDS pro možnost predikce účinků řízeného požáru uvnitř modelu šachty.
 - Vzájemné porovnání laboratorně měřených výsledků s daty získanými matematickou požární simulací.
- 5) Poskytnutí širšího spektra požárnětechnických informací k hořlavým bytovým jádrům v panelových bytových domech.

1.3 Struktura

Disertační práce je strukturována do pěti kapitol a doplněna čtyřmi tematickými přílohami:

„**Kapitola 1: Úvod**“ uvádí nejprve stručně do souvislosti historické a současné pojetí staveb a jejich požární rizika. Pro specifické a komplexní řešení moderních staveb pak obecně seznamuje s možnostmi využití požárněinženýrského přístupu a matematických simulací požáru, uvádí hlavní cíle a strukturování kapitol disertační práce.

„**Kapitola 2: Současný stav problematiky**“ ve své první části analyzuje rizika šachtových požárů na konkrétních příkladech, popisuje základní konstrukční a technické řešení instalačních šachet z hlediska pasivní a aktivní požární ochrany. Druhá část kapitoly se zaměřuje na různé možnosti modelování požáru v uzavřeném prostoru a podrobněji na specifika dále použitého simulačního programu Fire Dynamics Simulator (FDS) postaveného na technologii výpočtového proudění tekutin (CFD).

„**Kapitola 3: Experiment 1 – Laboratorní vs. matematický CFD model šachty**“ představuje numerické a vizuální porovnání účinků požáru v laboratorním modelu šachtového prostoru s predikcí získanou matematickou CFD simulací v programu FDS. Zjednodušený model je navržen pro dvě základní konstrukční řešení instalačních šachet z požárního hlediska, které jsou popsány v předchozí Kapitole 2, tj. průběžná a členěná šachta. Analýze jsou podrobeny základní požárněinženýrské veličiny jako teplota, rychlost proudění vzduchu a tepelný tok. Do modelu průběžné šachty s nehořlavým opláštěním je ve dvou dalších variantách implementováno náhradní požární zatížení v podobě částečného hořlavého opláštění z polymetylmetakrylátu (plexiskla) pro možnost sledování rozvoje požáru a šíření plamene po povrchu šachtových stěn. Do horní části modelu členěné šachty s nehořlavým opláštěním je integrována betonová stropní požární přepážka s různou mírou netěsnosti za účelem sledování chování vrstvy kouře v šachtě a možnosti přeskočení plamene nad stropní přepážku.

„Kapitola 4: Experiment 2 – Kalorimetrické zkoušky bytových jader panelových domů“ prezentuje především zajímavé a v odborné literatuře ojedinělé výsledky měření. Vysokoteplotnímu namáhání v kónickém kalorimetru bylo vystaveno 5 různých sad vzorků stěnových panelů hořlavých bytových jader, tj. prvků použitých i pro opláštění instalačních šachet, odebraných při rekonstrukcích bytových jednotek v pražských panelových bytových domech. Pro dvě úrovně tepelného namáhání byly sledovány požárnětechnické charakteristiky jako rychlost uvolňování tepla, úbytek hmotnosti, vydatnost oxidů uhlíku nebo celkové uvolněné teplo. Naměřená data měla původně sloužit k požárním simulacím, ale zkušenost z prvního experimentu si vynutila zjednodušení okrajových podmínek a využití vhodnějšího hořlavého materiálu pro opláštění modelu šachty.

„Kapitola 5: Závěry a doporučení“ ve své první části poskytuje konkrétní doporučení pro stavební praxi z hlediska požárnětechnického řešení šachet. V druhé části jsou shrnuty poznatky získané v průběhu dvou provedených experimentů prezentovaných v Kapitole 3 a 4. Dále následuje doporučení pro další výzkumnou práci v oblasti optimalizace požárních simulací.

„Příloha 1“ navazuje na Kapitulu 4 a uvádí naměřené výsledky z kónického kalorimetru v podobě grafů, a to pro pět různých vzorků hořlavých bytových jader a dvě úrovně tepelného namáhání. **„Přílohy 2, 3 a 4“** navazují na šachtový experiment prezentovaný v Kapitole 3. Příloha 2 uvádí naměřené výsledky z termo-gravimetrické analýzy polymetylmakrylátu (plexiskla) použitého pro hořlavé opláštění šachty. Zjištěné reakční parametry jsou využity jako vstupní data pro požární simulace. Příloha 3 uvádí klíčové části vstupních souborů prezentovaných požárních simulací v programu FDS. Příloha 4 uvádí grafy porovnávající měřené a simulované teploty a tepelný tok pro model členěné šachty. Jedná se o zbývající data, která jsou v příslušné kapitole pouze okrajově komentována a z důvodu obsáhlosti nevkládána.

Pro veškeré citace a soupis publikační činnosti je v disertační práci **použit citační styl APA** (American Psychological Association), jakožto styl používaný běžně i v kvalitní světové literatuře s požární tematikou (Drysdale, 1998) a předdefinovaný v bibliografické knihovně programu MS Word.

Kapitola 2:

Současný stav problematiky

2.1 Úvod do problematiky instalačních šachet

2.1.1 Tragické požáry šířící se šachtami

Následující vybrané příklady skutečných požárů, ať již v zahraničí nebo České republice, ilustrují naprostou nezbytnost funkčního požárního zabezpečení prostor šachtového charakteru. Ty se v opačném případě mohou velice snadno stát „požárním mostem“ a způsobit nevyčíslitelné primární i sekundární škody na zdraví a majetku.



Obr. 2.1 Příklady skutečných požárů: (a) MGM Grand hotel, USA, 1980; (b) hotel Olympik, Praha, 1995 (foto: HZS hl. m. Prahy); (c) panelový bytový dům, Čelákovice, 2007; (d) novostavba bytového domu, Uherské Hradiště, 2010 (foto: HZS Zlínského kraje)

MGM Grand hotel, USA, Las Vegas, Nevada, 21. listopadu 1980, 87 usmrcených, 700 zraněných, většina obětí v důsledku intoxikace. Nejtragičtější požár hotelu v novodobé historii USA. Příčinou je závada na elektroinstalaci v restauraci hotelového kasina, která následně způsobuje požár v 26 podlažích hotelu. Rozhodující vliv rychlého šíření požáru má plastové potrubí, velké množství nechráněných šachet (schodišťové, výtahové, instalační), hořlavé povrchy stavebních konstrukcí (tapety, obklady), absence aktivních požárních prvků apod.

Hotel Olympik, Praha, 26. května 1995, 8 usmrcených, 34 zraněných, všechny oběti z pásma zakouření. Požár vzniká v 11. patře v technické místnosti pokojské na chybně používaném elektrospotřebiči (textil v dotyku s výparníkem chladničky). Rychlé šíření kouře chodbami a dále komínovým efektem po schodišti do vyšších podlaží, rozšíření plamenného hoření z 11. do 13. patra (hořlavá madla a výplň zábradlí na schodišti). Rozhodující vliv na rychlé šíření požáru mají zejména hořlavé povrchové úpravy stavebních konstrukcí (podhledy), neexistující požární úseky a uzávěry na schodištích, nemožnost vertikálního odvětrání v nejvyšším místě schodiště apod.

Panelový bytový dům, Čelákovice u Prahy, 29. června 2007, 1 zraněný. Požár vzniká v bytové jednotce v 7. NP vlivem nedbalosti (vzplanutím tuků na sporáku). Požár zasahuje umakartové bytové jádro, instalační šachtou se šíří do bytové jednotky v 8. NP a dále opět šachtou na hořlavou konstrukci střechy. Požárem je zasažena celá střecha bytového domu o dvou sekcích (dva vstupy). Při hasebním zásahu dochází k promáčení všech bytových jednotek a společných částí domu včetně přízemí. Dům je celkově neobyvatelný cca 3 měsíce. Rozhodující vliv na rychlé šíření požáru má nedostatečné požární zajištění instalační šachty propojující bytové jednotky a střechu, nefunkční zařízení pro protipožární zásah (nástěnné požární hydranty i přenosné hasicí přístroje).

Novostavba bytového domu, Uherské Hradiště, 6. listopadu 2010, 12 evakuovaných osob s lehkou intoxikací. Požár vzniká v plastovém kontejneru na odpad u obvodové stěny. Požár se rychle šíří po kontaktním zateplení s tepelným izolantem z pěnového polystyrenu. Odkapávající polystyren zapaluje řadu aut zaparkovaných u domu a intenzita požáru se tak výrazně zvyšuje. Porušené prosklené vstupní dveře umožňují průnik kouře do schodišťové šachty, který se tak rychle šíří do vyšších podlaží. Ohrožené osoby se ukrývají na opačné straně domu na balkonech a evakuováni jsou v dýchacích maskách až při protipožárním zásahu.

2.1.2 Druhy šachet v budovách a rizika vertikálního šíření požáru

Šachty v budovách lze rozdělit do dvou základních skupin, a to na instalační šachty a šachtové prostory bez vnitřních instalací.

1) Instalační šachty

- šachty s technickými instalacemi – přístupné často ze soukromých prostor (např. byty) s rozvody kanalizace (splašková, dešťová), vody (teplá, studená, cirkulace), vytápění (přívodní a odvodní potrubí), VZT, eventuálně i plynu;
- elektroinstalační šachty – přístupné většinou ze společných částí objektu (chodby, schodiště – únikové cesty) se silnoproudými rozvody včetně elektroměrů nebo slaboproudými rozvody (datové kabely);
- šachty se VZT rozvody – nejčastěji šachty pro odvětrání společných částí objektů (garáže, schodiště apod.);
- výtahové šachty.

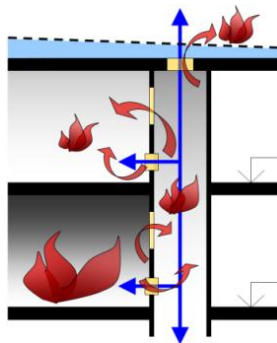
2) Šachty bez vnitřních instalací

- prosvětlovací a větrací šachty („světlíky“) ve starší bytové zástavbě – zaústění hygienických prostor (WC, koupelny), zádveří, chodeb apod.;
- šachty pro shozy prádla a odpadků – v patě šachty bývá napojená shromažďovací místnost a v běžných podlažích pak technická místnost pro přístup ke shozu;
- šachty pro odvody kouře a tepla, schodišťové šachty apod.

Rizika vertikálního šíření požáru šachtami se úměrně zvyšují s chybným požárním řešením a mezi rozhodující faktory zejména patří:

- vysoká koncentrace hořlavých látek na malé půdorysné ploše (potrubí, kabely, izolace);
- rozvody plynu včetně plynoměrů (zejména panelové bytové domy);
- usazované nečistoty – zejména prach a mastnota (odtahy z kuchyňských provozů) a odpady vhazované do šachet (papír, plastové lahve, nedopalky cigaret apod.);
- skladovaný materiál v únikových cestách (návaznost na elektroinstalační šachty);
- nedostatečná požární odolnost revizních dvířek a opláštění šachty (např. umakartová jádra v panelové výstavbě, plechové pláště elektroinstalačních šachet);
- chybně řešené požární ucpávky zejména na plastovém potrubí a kabelových rozvodech;
- nepřístupnost soukromých prostor stávajících šachet pro možnost požární sanace apod.

Z hlediska vertikálního šíření požáru jsou nejvíce rizikové bytové a elektroinstalační šachty. V bytových šachtách vzniká téměř vždy ohnisko požáru mimo šachtu (Obr. 2.2), nejčastěji pak v kuchyni. Z pohledu elektroinstalačních šachet je riziko jak v šachtě (zkrat), tak pod šachtou, kde bývají umístěné např. v podzemním podlaží objektové elektrorozvaděče, popř. jiné rizikové prostory (např. garáže). Šachty se tak většinou stávají pro požár pouze cestou („požárním mostem“) a riziko rozšíření požáru do navazujících prostor je přímo úměrné (ne)kvalitě požárního řešení šachty.



Obr. 2.2 Vznik požáru mimo instalační šachtu a následné riziko vertikálního šíření požáru do vyšších podlaží a na střechu objektu

Instalační šachty mají často návaznost na střešní plášť (odvětrání kanalizace, vyústění VZT) a lokální požár v budově se může stát požárem velkoplošným, zejména u hořlavých střešních plášťů – dvouplášťové střechy s dřevěným horním pláštěm nebo jednoplášťové střechy s tepelnou izolací polystyrenových spádových klínů a hořlavou povlakovou krytinou. V těchto případech je správnost provedení a funkčnost požárních ucpávek zásadní z hlediska zabránění přenosu požáru na střešní plášť.

Represivní zásah při požáru šachet bývá pro hasiče velice zrádný. Požárem může být napadeno nebo přímo ohroženo více požárních úseků napojených na šachtu a hasiči nemusí znát přesnou polohu ohniska požáru. Jsou například přivoláni k požáru bytu, kde z šachty vychází kouř, avšak příčina požáru může být úplně v jiném bytě. Šachty jsou ze střechy nebo z interiéru prolévány hasivem a sekundární škody mohou vznikat promáčením v mnoha podlažích. Hašení tak může být dlouhou dobu následek, nikoliv příčina požáru.

2.2 Dynamika požáru v uzavřeném prostoru

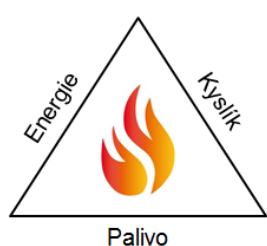
Dynamika požáru v uzavřeném prostoru (např. v místnosti) je významná požárněinženýrská disciplína charakteristická nespočtem zajímavých fyzikálních jevů, kterým se podrobně věnují mnozí autoři v zahraničí a stále více i v České republice. Na úrovni teoretické a experimentální jsou řešena především témata charakterizující rozvoj požáru, proces hoření, sdílení tepla, chování a složení kouře apod.

2.2.1 Charakteristický rozvoj požáru

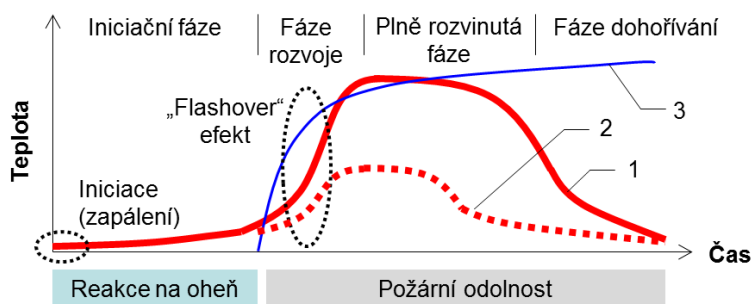
Hoření je oxidační exotermický děj doprovázený uvolňováním tepelné a světelné energie za neustálé spotřeby vzdušného kyslíku a produkce zplodin hoření. **Hoření probíhá při rovnováze tří základních podmínek, tzv. trojúhelníku hoření, kterými jsou hořlavá látka – palivo,**

oxidační prostředek – vzdušný kyslík a dostatečná **tepelná energie** – iniciační zdroj zapálení (Balog & Kvarčák, 1999). Pro omezení nebo likvidaci procesu hoření postačí narušení vazeb trojúhelníku hoření (Obr. 2.3), tj. například zamezit vzniku hořlavých plynných produktů, zvýšit nedokonalost spalování nebo ochladit palivo. Na těchto principech pracují veškerá hasiva a hasicí zařízení.

Dostatek kyslíku a paliva při hoření výrazně ovlivňuje rozvoj požáru. Je-li k dispozici dostatečný přívod vzduchu do zóny hoření, je **požár řízen palivem**, tj. jeho intenzitu ovlivňuje množství hořlavého materiálu (Obr. 2.3 (b)). V opačném případě, kdy přívod vzduchu pro spalování je omezený, dochází k značnému vývoji kouře, intenzita hoření je nižší a stav je označován jako **požár řízený odvětráním** (používáno je též označení požáru řízeného ventilací, atmosférou nebo kyslíkem).



(a)



(b)

Legenda: 1 = plně rozvinutý požár řízený palivem, 2 = požár řízený odvětráním, 3 = normový požár (normová teplotní křivka)

Obr. 2.3 (a) podmínky hoření (trojúhelník hoření); (b) charakteristický rozvoj požáru v uzavřeném prostoru

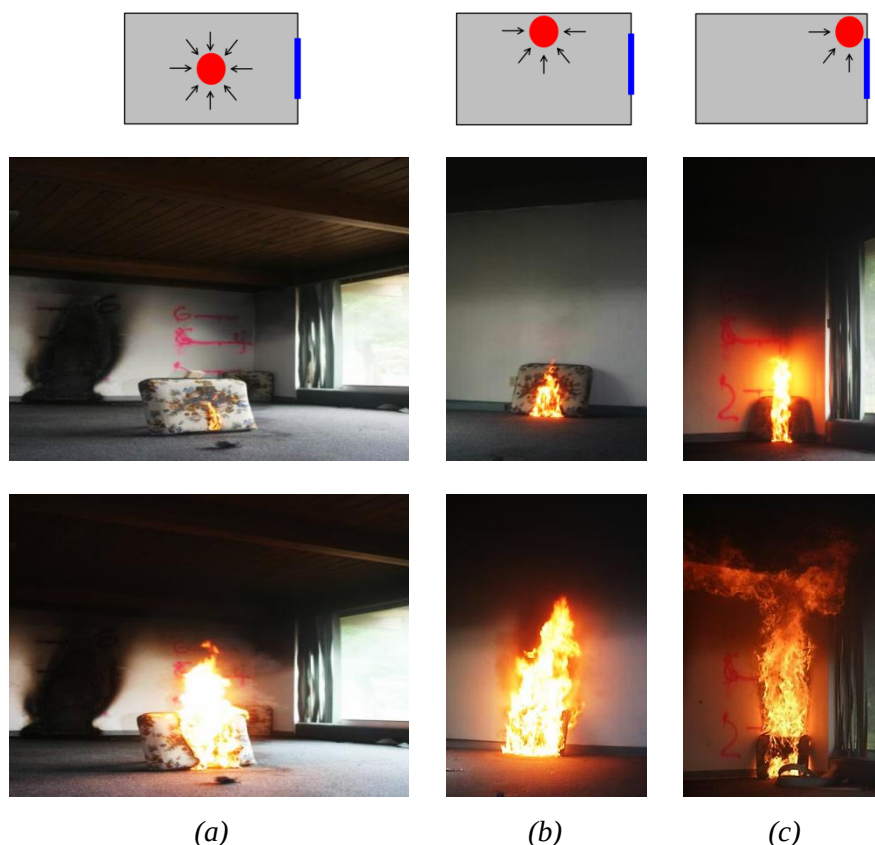
Na základě reálných nebo experimentálně prováděných požárů v uzavřeném prostoru lze průběh plně rozvinutého požáru rozdělit na čtyři charakteristické časové fáze – **iniciaci, rozvoj, plně rozvinutý požár a dohořívání**.

V první fázi dochází díky iniciačnímu zdroji (např. převržená svíčka, nedopalek cigarety, zkrat apod.) k **zapálení hořlavého materiálu a jeho rozhořívání**. Tato fáze může být časově značně variabilní a s délkou trvání v řádu několika málo sekund, minut, ale i hodin, a to dle povahy a umístění hořlavého materiálu, síly iniciačního zdroje, přístupu kyslíku, geometrie prostoru apod. V druhé fázi rozvoje dochází k výraznému vertikálnímu vztlačovému transportu kouře (tzv. oblast **fire plume**) ze zóny hoření pod stropní konstrukci. Zde se vrstva kouře postupně kumuluje, nahřívá a zvětšuje její hustota. Vrstva kouře pod stropem běžné místnosti zahřátá již na teplotu okolo 150–200 °C vyvolává díky zpětné radiaci tepla směrem k podlaze podmínky neslučitelné se životem. Po dosažení teploty kouře cca 500–600 °C dochází k prostorovému vzplanutí místnosti (tzv. **flashover efekt**), tj. k přeskoku požáru z lokálního zdroje (např. samostatně hořící předmět) na zbytek prostoru přes zahřátou vrstvu velmi koncentrovaného kouře. Flashover efekt je charakteristický prudkým nárůstem teplot. V třetí fázi plně rozvinutého požáru jsou teploty maximální (až okolo 1 000 °C) a v zasaženém prostoru hoří vše, co hořet může. V poslední čtvrté fázi dochází ke snižování teplot díky redukci hořlavého materiálu a k postupnému chladnutí požáru (SP, 2003).

Do okamžiku flashover efektu je klíčové, do jaké míry výrobky v zóně hoření přispívají svou hořlavostí (třídou reakce na oheň) k rozvoji požáru a svou povahou a umístěním ovlivní i fakt,

zda k flashover efektu vůbec dojde. Pokud k plnému rozvinutí požáru dojde, právě v okamžiku prostorového vzplanutí začíná klíčová role požární odolnosti nosných a požárně dělicích konstrukcí. Požárněbezpečnostní zařízení (zejména EPS, SHZ, ZOKT) jsou v budovách navrhována tak, aby včas detekovala, likvidovala či zmírňovala intenzitu vznikajícího požáru takovým způsobem, aby k flashover efektu vůbec nedošlo.

Tento obecně charakterizovaný rozvoj požáru v uzavřeném prostoru je implementován do konkrétních matematicky popsaných modelů pro praktické využití – tzv. **teplotní křivky**. Ve stavební praxi se používají 2 typy teplotních křivek popisujících plně rozvinutý požár, tj. od okamžiku flashover efektu. Prvním jednodušším typem jsou tzv. **nominální teplotní křivky**, které reprezentují pouze rozvoj teploty a obvykle se používají k ověřování požární odolnosti stavebních konstrukcí. Jedná se nejčastěji o normovou teplotní křivku (Obr. 2.3 (b)) reprezentující požár celulózového typu, dále o křivku uhlovodíkovou (požáry kapalin), křivku vnějšího požáru, křivku pomalého zahřívání, tunelovou křivku apod. Druhým typem jsou tzv. **parametrické teplotní křivky** popisující požár pro různou intenzitu odvětrání uzavřeného prostoru, různou hustotu požárního zatížení a různé vlastnosti ohraničujících konstrukcí. Kromě rozvoje teploty navíc parametrické křivky popisují i fázi chladnutí hořícího prostoru. Své uplatnění našly zejména v Eurokódech při podrobných statických výpočtech požární odolnosti stavebních konstrukcí. Problematikou dynamiky se též komplexně zabývají autoři požární (červené) edice SPBI (Kučera, Kaiser, Pavlík, & Pokorný, 2008).



Obr. 2.4 Vliv polohy hořícího předmětu (matrace) na případný rozvoj požáru v místnosti: (a) uprostřed místnosti; (b) u stěny; (c) v rohu místnosti (Hošek, 2009); (Drysdale, 1998)

Poloha hořícího předmětu vůči okolním stěnám má výrazný vliv na velikost plamene a následně i na rozvoj požáru. Při požárech v prostorách šachtového charakteru je tento efekt umocněn vzájemně blízkými stěnami po obvodě šachty. To dokumentuje jednoduchý

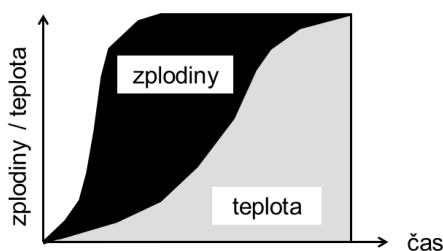
experiment, ve kterém je do místnosti s dostatečným přívodem vzduchu umístěn hořící předmět (matrace) a zapálen ve třech různých půdorysných polohách – uprostřed místnosti, u stěny a v rohu místnosti (Obr. 2.4). Sloupec hořících plynů (fire plume) nad hořícím předmětem uprostřed místnosti je ochlazovaný přísáváním vzduchu po celém svém obvodu a tomu odpovídá jistá míra rychlosti uvolňovaného tepla a velikosti plamene. Je-li hořící předmět umístěn ke stěně, ochlazovaný obvod oblasti fire plume se zmenší přibližně na polovinu a předmět hoří intenzivněji. Nejdramatičtější je situace, kdy je předmět umístěn do rohu místnosti. Fire plume je ochlazován pouze přibližně z jedné čtvrtiny ve srovnání s hořícím předmětem uprostřed místnosti a plameny dosahují stropu a pod stropem se šíří horizontálně dále.

2.2.2 Toxicita zplodin hoření a polymery

Hoření jako oxidační exotermický děj je doprovázené následujícími jevy:

- světelným efektem (plamenné hoření, žhnutí);
- uvolňováním tepelné energie;
- úbytkem vzdušného kyslíku;
- uvolňováním zplodin hoření (kouř, toxické plyny, páry);
- vznikem nespalných zbytků (saze, popel).

Zjednodušeně lze konstatovat, že v „dřívějších“ dobách byl v lidském obydlí s vysokým podílem dřeva v konstrukcích (stěny, stropy, krov, nábytek apod.) primárním požárním rizikem oheň, zatímco v současné době jsou neméně rizikové zplodiny hoření z důvodu velkého podílu hmot na bázi polymerů. Ty ohrožují živý organismus již v prvotních fázích požáru (Obr. 2.5) a toxické mikroklima v objektu se může stát neslučitelné se životem i v místech značně vzdálených od ohniska požáru. Následný rozvoj požáru a vysoké teploty atakují stavební konstrukce a ohrožují jejich stabilitu a požární dělicí funkci.



Obr. 2.5 Schéma primárního vývoje zplodin hoření (kouř, toxické plyny) a sekundárního rozvoje teploty při požárech

2.2.2.1 Základní vlastnosti a pohyb kouře

Drobné pevné částice se při požáru vlivem zvyšujících se teplot v prostoru a proudění plynů dávají do pohybu a následně se mísí se vzduchem. Takto vzniklou směs – **kouř definujeme jako disperzní (rozptýlenou) směs plyných zplodin hoření, nespalných tuhých částic o velikosti 10^{-5} až 10^{-7} cm, z kondenzovaných látek a velkého množství vzduchu.**

Optická hustota kouře, též označovaná jako jeho průzračnost, je ovlivněna druhem hořící látky, její schopností vytvářet při hoření tuhé částice (saze) a intenzitou výměny plynů. Zejména při hoření polymerů a v prostorech s nedostatečnou ventilací vzniká řada toxických plyných zplodin ohrožujících během, ale i po požáru životy evakuovaných osob a zasahujících hasičů.

Agresivní složky kouře v místech i přímo nezasažených požárem mohou značně znehodnocovat uskladněný materiál, a dokonce způsobovat poškození povrchových vrstev stavebních konstrukcí, což je jev označovaný jako **korozivita zplodin**. Zvláště agresivní zplodiny vznikají při hoření neretardovaných kabelových izolací z měkčeného PVC.

Částice v horkém kouři jsou natolik malé, že jejich pohyb není ovlivňován až tak gravitací, ale spíše se jedná o **chaotický tzv. Brownův pohyb**, v jehož důsledku zůstávají částice ve vznosu. Postupně však dochází ke koagulaci (srážení) částic do větších shluků a na tyto shluky již gravitační zákon působí. Tento jev je označován pojmem **stárnutí kouře**, tj. sedání kouře do nejnižších částí hořícího prostoru (Šenovský, Prokop, & Bečák, 2007). Kouř opticky mizí, riziko přítomnosti toxických zplodin hoření však dále v požářišti zůstává.

Pásmo zakouření v budovách je možné rozdělit na dvě základní zóny:

- **Zóna horkého kouře** zahrnuje části budovy blízké požářišti, kde teplota kouře je natolik vysoká, že díky rozdílné objemové hmotnosti proti okolnímu vzduchu a díky expanzi hořících plynů stoupá ke stropu, zatímco studený a méně znečištěný vzduch je vtlačován do spodních částí místnosti. V horní zakouřené vrstvě vzniká přetlak, ve vrstvě spodní podtlak. Rozhraní mezi těmito vrstvami s neutrálními (nulovými) tlakovými poměry je označováno jako **neutrální rovina**.
- **Zóna studeného kouře** zahrnuje ty části budovy, ve kterých se již kouř sdílením tepla s okolím natolik ochladil, že jeho hustota je srovnatelná s hustotou okolního vzduchu. Pohyb kouře je ovlivňován vnějšími silami, jako je komínový efekt, vítr, VZT zařízení apod. Studený kouř může mít v objektech z hlediska svého pohybu i klesající charakter a může často nepozorovaně migrovat netěsnostmi v konstrukcích do míst značně vzdálených a i níže položených vzhledem k ohnisku požáru.

Při proudění horkého kouře šachtami (instalačními, výtahovými, schodišťovými) je sdílení tepla s konstrukcemi často zanedbatelné, a kouř je tak schopný urazit značnou vzdálenost, aniž by se ochladil. Komínový efekt je dále podrobněji popsán v kapitole 2.5.4.

2.2.2.2 Polymery

Pod pojmem polymery jsou označovány organické látky, tj. sloučeniny uhlíku s velkými molekulami (makromolekulami) s vysokou molekulovou hmotností, které vznikají chemickou reakcí při spojování molekul jednoduché sloučeniny (Masařík, 2003). **Plasty jsou látky specifických vlastností, jejichž podstatou jsou organické polymery**. Reakce doprovázená vznikem polymeru je označována pojmem polymerace a její princip je možné znázornit následujícím schématem:



kde: n – počet molekul jedné sloučeniny

X – jednoduchá sloučenina (monomer)

Xn – makromolekulární látka (polymer) z „ n “ vzájemně spojených molekul

Polymerací nejsou výrobky schopné okamžitého použití. Do základní receptury jsou přidávány změkčovadla, maziva, plniva, stabilizátory, retardéry hoření aj. pro dosažení konečných požadovaných vlastností výrobků – tzv. **modifikace polymerů**.

Z hlediska prostorového uspořádání makromolekul se rozlišují dvě skupiny polymerů:

- **Polymery s lineární strukturou** (polyetylen, polypropylen, polystyren, polyvinylchlorid apod.) mají vzájemně snadno pohyblivé makromolekuly převážně v jednom směru s minimální větveností jejich řetězců.
- **Polymery se zesíťovanou strukturou** (zesíťovaný polypropylen nebo polyvinylchlorid) mají makromolekuly s trojrozměrnou prostorovou strukturou omezující pohyblivost molekul. Vyšší je tak jejich tvrdost, pevnost, tepelná a chemická odolnost, netaví se a mají menší houževnatost a pružnost proti lineárním polymerům.

Z hlediska deformačních vlastností lze polymery rozdělit do dvou základních skupin:

- **Plasty** jsou tvarovatelné polymerní látky procházející alespoň jednou plastickým stavem. **Termoplasty** jsou typem plastu měknoucího opakovaným ohřevem (např. polypropylen, PVC, PMMA), naopak tepelně vytvrzené **reaktoplasty** (dříve označované jako termosety, duromery nebo duroplasty) již nelze dalším ohřevem tvarovat (např. bakelit, epoxidová pryskyřice).
- **Elastomery** jsou polymerní látky za běžných podmínek v „kaučukovitém“ stavu vracející se rychle do původních rozměrů, z nichž byly deformovány i poměrně malým napětím (např. pryž, silikon, polyuretan).

Zejména pro polymery je velmi rozšířené a všeobecně přijímané stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla (Kupilík, Konstrukce pozemních staveb – Požární bezpečnost staveb, 2009). Podstatou této metody je stanovení limitní koncentrace kyslíku (v objemových %) ve směsi s dusíkem, při kterém ještě je na zkušebním vzorku po zapálení udrženo jeho plamenné hoření. Čím je kyslíkové číslo (KČ) menší, tím je materiál hořlavější. Podle jeho hodnoty se rozlišují **hmoty nehořlavé s KČ > 50 %**, **samozhášivé s KČ 50–27 %**, **hořlavé s KČ 27–20 %** a **hmoty lehce hořlavé s KČ < 20 %**. Metoda je použitelná pro plasty, fólie, vlákna, pryž aj., avšak nehodnotí například žhnutí a odkapávání. Metoda může sloužit například jako indikátor přítomnosti (ne)žádoucích látek (změkčovadla, plnidla apod.). **Výhřevnost** nejen v případě polymerů je dalším důležitým požárnětechnickým parametrem charakterizujícím množství tepla v joulech uvolněného úplným spálením 1 kg hořlavé látky za předpokladu, že voda vzniklá spálením látky zůstane ve spalínách ve formě vodní páry (ČSN 73 0824, 1992). V následující tabulce je provedeno orientační srovnání vybraných plastů.

Tab. 2.1 Kyslíkové číslo a výhřevnost vybraných plastů ve srovnání se dřevem

Materiál	Kyslíkové číslo KČ (%)	Výhřevnost H (MJ/kg)
Konstrukční dřevo	20,5	17
Polymetylmetakrylát (PMMA)	17	25
Polykarbonát (PC)	27	29
Polyvinylchlorid (PVC)	30–45	17–21
Polyetylen (PE)	18	43
Polypropylen (PP)	19	45
Expandovaný polystyren (EPS)	18–20	39

2.2.2.3 Retardace polymerů

Polymery obecně se vyznačují nepříznivými požárnětechnickými vlastnostmi. **Metody snižování hořlavosti polymerů jsou označovány pojmem retardace** (Mleziva & Šňupárek, 2000) a vlastní retardéry hoření z hlediska aplikace jsou rozdělovány do třech následujících skupin:

- **Aditivní retardéry** jsou látky přidávané s dalšími přísadami (plniva, změkčovadla, stabilizátory, pigmenty apod.) do polymerů za účelem úpravy jejich vlastností.
- **Reaktivní retardéry** jsou součástí reakční směsi při polymeraci, vstupují do makromolekulárního řetězce polymeru a zůstávají v něm tak trvale chemicky vázány.
- **Povrchové retardéry** jsou směsi látek nebo kombinace materiálů upravené do formy schopné vytvořit ochrannou vrstvu na povrchu polymeru.

Retardace pomocí aditivních retardérů je postup technologicky dostupný a propracovaný, který se v podstatě neliší od přidávání dalších přísad do polymerů modifikujících jejich vlastnosti. Určitým problémem je zajištění dokonalé homogenizace aditivních retardérů v polymeru a stálosti jejich účinku při dlouhodobém používání retardovaných plastů ve výrobcích vystavených působení světla, tepla a vlhkosti. Aditivní retardéry mívají negativní dopad na různé vlastnosti plastu, a je proto nutno hledat kompromisní řešení mezi zlepšením požárnětechnických charakteristik a zachováním potřebné úrovně těch vlastností, které jsou důležité pro zvolenou aplikaci plastu. Použití aditivních retardérů je typické především pro termoplasty.

Retardace pomocí reaktivních retardérů je obvykle velmi účinná, má trvalý charakter a není zatížena nevýhodami aditivních retardérů. Je však technologicky náročnější, dražší a z těchto důvodů není tak rozšířena. Chemické zásahy do řetězce se provádějí zejména u pryskyřic určených pro reaktoplasty. V některých případech se k plastům s reaktivními retardéry přidávají ještě aditivní retardéry za účelem zvýšení účinnosti retardace.

Retardace pomocí povrchových retardérů je technologicky nejméně náročná a relativně levná. Prostředky povrchové ochrany ve formě nátěrů, nástřiků, nánosů, obalů nebo obkladů neovlivňují vlastnosti chráněného plastu, jsou celkem dostupné a lze je snadno aplikovat v nejširší sféře. Určitým problémem je zajištění dostatečné adheze nátěrových prostředků k povrchu chráněného plastu a jejich dlouhodobé odolnosti proti vlivům vnějšího prostředí. Použití povrchových retardérů je typické například pro ochranu vodičů, tj. pro kabelové izolace v podobě zábranových požárních nátěrů.

Z hlediska chemického složení retardérů se jedná o sloučeniny obsahující tyto prvky (přibližně podle klesající četnosti) – **brom, fosfor, chlor, antimon, hliník, hořčík, dusík, bor, síra, křemík, vápník, a řidčeji sloučeniny některých dalších kovových prvků, například zinku, železa, cínu**. Ke zlepšení požárnětechnických charakteristik plastů přispívají i přísady na bázi skleněných vláken v různých formách.

V poslední době se zřetelně vymezuje další skupina retardérů, které do určité míry působí současně jako aditivní retardéry a prostředky povrchové ochrany. Jsou to tzv. **intumescentní systémy**, které se skládají z více složek a přidávají se do polymeru jako jiné aditivní retardéry. Reakcí složek systému a polymeru při tepelném rozkladu a hoření dochází k procesu uhelnatění polymeru a současně se z intumescentního systému uvolňují plyny působící jako nadouvadlo. Výsledkem je vytvoření pěnové zuhelnatělé vrstvy na povrchu hořícího polymeru připomínající lehčené hmoty. Tato vrstva působí jako ochrana, zabraňuje přístupu kyslíku k povrchu polymeru

a přestupu tepla ze zóny hoření k polymeru. Působí tedy do jisté míry jako tepelněizolační vrstva chráněného prvku. Tento způsob je používán pro některé termoplasty a je považován za ekologicky šetrnější.

2.2.2.4 Principy toxikologie hoření polymerů

Požárně nebezpečné vlastnosti polymerů jsou charakteristické zejména vysokou hořlavostí a intenzitou hoření, vznícením a vzplanutím, teplotou zápalnosti, výhřevností, dýmotvornou schopností a náchylností k tepelnému rozkladu s vývinem toxických zplodin (Kupilík, 2009).

Druh a množství produktů ve spalínách hoření závisí na řadě faktorů, zejména na chemickém složení hořící látky, typu a míře dokonalosti hoření (podmínkách přístupu vzduchu) a na teplotě. Při hoření organických látek (papír, dřevo, textil apod.) a při hoření polymerů jakožto organických sloučenin uhlíku jsou ve zplodinách vždy přítomny oxid uhličitý (CO_2), uhelnatý (CO) a další oxidy (siřičitý, dusičitý, dusnatý), vodní pára, kyslík a obvykle jsou přítomny uhlovodíky a kyslíkaté organické látky. V případě polymerů obsahujících dusík se ve zplodinách objevují kyanovodík (HCN), nitrily a jiné dusíkaté látky, z polyvinylchloridu a fluorovaných polymerů pak chlorovodík (HCl) a fluorovodík (HF), ale též fosgen (ClCO_2) apod.

Složení směsi hoření je rovněž značně závislé na teplotě hoření. Při teplotách 300–400 °C se objevuje poměrně málo produktů jak v počtu, tak množství. Střední rozsah teplot 400–700 °C se naopak obvykle vyznačuje směsí s širokým spektrem toxických plynů o vysokých koncentracích. Při teplotách nad 700 °C opět klesá počet a množství produktů ve zplodinách (Masařík, 2003). V toxikologii hoření jsou život nejvíce ohrožující označovány následující dva druhy látek:

- **Látky s narkotickými účinky** (CO , HCN , CO_2) se po vdechnutí velmi snadno vážou na hemoglobin (krevní barvivo) a brání tak vazbě hemoglobinu s kyslíkem, kterého je pak v tkáních nedostatek. Způsobují snížení vnímavosti osob, ztrátu vědomí a selhání centrálního nervového systému.
- **Látky s dráždivými účinky** (halogenovodíky, oxidy dusíku, akrolein, formaldehyd) způsobují dráždění očí, horních cest dýchacích a plic. Projevují se nepohodou až těžkou bolestí a dezorientací osob.

2.2.3 Přenos tepla v podmínkách požáru

Přenos tepla je vědní disciplína zkoumající principy transportu (sdílení) tepelné energie mezi hmotnými tělesy jakožto důsledek jejich teplotních rozdílů (Holman, 1997). Přenos tepla je nejčastěji popisován třemi následujícími způsoby:

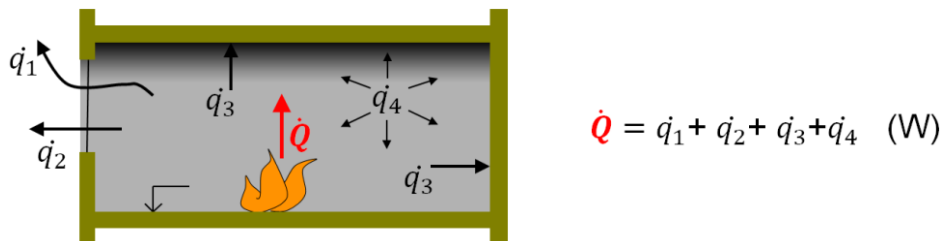
- **vedení tepla (kondukce)** – pevné látky, tekutiny v klidu (kapaliny, plyny);
- **proudění tepla (konvekce)** – proudící tekutiny;
- **sálání tepla (radiace)** – nevyžaduje hmotné prostředí.

Podle proměnlivosti teplotního pole v čase je rozlišováno:

- **stacionární (ustálené) teplotní pole** – v jednotlivých bodech se v čase nemění;
- **nestacionární (neustálené) teplotní pole** – v jednotlivých bodech se v čase mění.

Z hlediska směru přenosu lze teplotní pole sledovat v jednom, dvou nebo třech směrech. Ve skutečnosti jsou všechna teplotní pole třídimenzionální a nestacionární. Pro matematické popsání

transportu tepla je však často užitečné a žádoucí provést zjednodušení, která jsou s dostatečnou přesností použitelná pro praktické aplikace. Tímto způsobem pak reálné teplotní pole může být například zjednodušeně popsáno jako jednorozměrné a stacionární. Pro vícedimenzionální výpočty nestacionárních polí je dnes využíváno výhradně výpočetní techniky.



Obr. 2.6 Tepelná bilance v uzavřeném prostoru při plně rozvinutém požáru (Karlsson & Quintiere, 2000)

Pro plně rozvinutý požár v uzavřeném prostoru s otvory (například místnost s okny) je **tepelná bilance hořícího prostoru** (Obr. 2.6) dána celkovou rychlostí uvolněného tepla ($\dot{Q}$) jakožto součtem tepelných ztrát ve formě proudícího kouře a horkých plynů (q_1), vysálaného tepla mimo hranice hořícího prostoru (q_2), tepla na ohřev ohraničujících stavebních konstrukcí (q_3) a tepla na ohřev hořícího prostoru a vybavení (q_4). **Při požárněinženýrských výpočtech se běžně počítá s působením radiace a konvekce na povrch stavebních konstrukcí a následně s kondukcí tepla uvnitř těchto konstrukcí.**

2.2.3.1 Vedení tepla – konduktce

Fyzikální podstata děje spočívá v pohybu elementárních částic v pevných látkách nebo tekutinách, při kterých oblasti s vyšší kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. V plynech se uskutečňuje difuzí molekul a atomů, v kapalinách a nevodivých pevných tělesech pružným vlněním, v kovech difuzí volných elektronů. V tekutinách (kapaliny, plyny) dochází k vedení tepla za jejího zanedbatelného pohybu, v opačném případě se teplo začíná šířit prouděním. Ustálené vedení tepla popisuje **Fourierův zákon** jako hustotu tepelného toku přímo úměrnou teplotnímu gradientu podle následující rovnice:

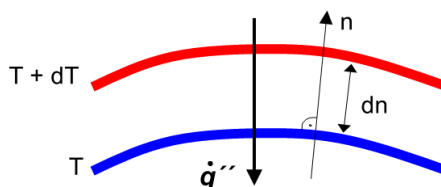
$$\vec{q}'' = -\lambda \cdot \nabla T = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

kde: $\vec{q}''$ – vektorový zápis hustoty tepelného toku sdílené kondukcí (W/m²)

λ – součinitel tepelné vodivosti (W/m/K)

∇T – teplotní gradient (K/m)

Součinitel tepelné vodivosti jakožto materiálová charakteristika není konstantní hodnotou, ale mění se u většiny materiálů se vzrůstající teplotou. Z předchozí rovnice je patrné, že pro výpočet hustoty tepelného toku je potřebná znalost teplotního pole a že **tepelný tok je vektorová veličina mající určitou velikost a směr**. Záporné znaménko v rovnici znamená, že tepelný tok a teplotní gradient ve směru normály k izotermickým povrchům mají jako vektory opačný směr (teplo se šíří ve směru klesající teploty).



Obr. 2.7 Jednodimenzionální znázornění tepelného toku mezi dvěma izotermickými povrchy

V rámci matematického zjednodušení bývá vektorový zápis $\vec{q''}$ nahrazován zápisem q'' , zcela obdobně je tomu u konvekce a radiace. Je-li převeden třídimenzionální vektorový zápis na jednorozměrný (Obr. 2.7), lze pro hustotu tepelného toku q'' odvodit následující vztah:

$$q'' = -\lambda \cdot \text{grad } T = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \quad (2.3)$$

kde: q'' – hustota tepelného toku sdílená kondukcí (W/m^2)

grad T – teplotní gradient (K/m) ve směru normály „n“ k izotermickému povrchu

2.2.3.2 Proudění tepla – konvekce

Někteří autoři popisují pouze dva základní mechanismy přenosu tepla, a to kondukcí a radiací. Konvekce je pak popisována pouze jako specifický případ kondukce tepla mezi tekutinou a pevným povrchem (strukturou) v tzv. mezní vrstvě. Pohyb tekutiny ovlivňuje teplotní pole, a proto tepelný tok závisí na rychlosti tekutiny a jejích vlastnostech (Karlsson & Quintiere, 2000). Hustota tepelného toku způsobená konvektivním přestupem tepla je nejčastěji definována jednoduchým empirickým vztahem pomocí Newtonovy rovnice:

$$q''_c = \alpha \cdot (T - T_s) \quad (2.4)$$

kde: q''_c – hustota tepelného toku sdílená konvekcí (W/m^2)

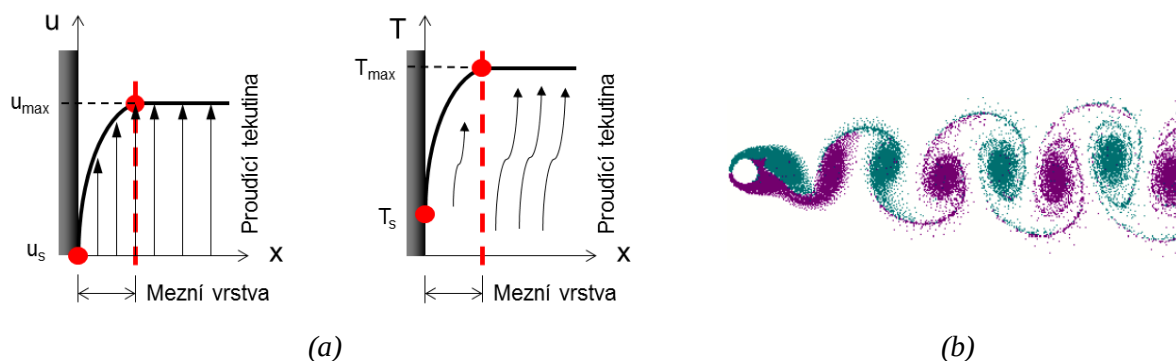
α – konvektivní součinitel přestupu tepla ($\text{W/m}^2/\text{K}$)

T – teplota proudící tekutiny, v případě požáru teplota hořících plynů (K nebo $^{\circ}\text{C}$)

T_s – teplota struktury pevného povrchu (K nebo $^{\circ}\text{C}$)

Sdílení tepla konvekcí je důležitým faktorem při šíření plamene a při vzestupném přenosu horkých zplodin hoření ke stropu nebo z oken místnosti (Obr. 2.6). Výpočty konvekce obvykle zahrnují přenos tepla mezi povrchem stavební konstrukce a okolním prostředím, které tuto konstrukci ohřívá nebo ochlazuje. Charakteristické hodnoty součinitele přestupu pro stavební prvky vystavených účinku požáru jsou empiricky definovány v Eurokódu 1 (ČSN EN 1991-1-2, 2006) a například při použití jednoduchých požárních modelů se doporučuje uvažovat konvektivní součinitel přestupu tepla $35 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Z hlediska charakteru vzniku vzdušného proudu lze rozlišit **proudění přirozené (volné) a umělé (vázané, nucené)**. U přirozeného proudění je pohyb vyvolán výše popsaným konvekčním principem daným především teplotním rozdílem tekutiny a pevného povrchu. V případě umělého proudění je pohyb tekutiny vyvolán vnějším zdrojem, například ventilátorem. Podle rovnoměrnosti konvekčního proudu je dále rozlišováno **proudění laminární a turbulentní**. Laminární proudění se vyznačuje rovnoměrným pohybem tekutiny v přibližně rovnoběžných vrstvách, zatímco u proudění turbulentního dochází k výraznému mísení vrstev (Obr. 2.8).



Obr. 2.8 (a) průběh rychlosti proudění (u) a teploty (T) pro oblast v mezní vrstvě v blízkosti pevné struktury – povrchu; (b) princip turbulentního proudění

Při proudění tekutiny se v těsné blízkosti pevného povrchu vytváří specifická oblast, tzv. **mezní vrstva**, v níž se v důsledku vazkosti tekutiny mění rychlost proudu spojitě od nulové hodnoty na pevném povrchu až do rychlosti vnějšího proudu a analogicky dochází v této oblasti i ke změně teploty (Obr. 2.8 (a)). Mezní vrstva může mít laminární nebo turbulentní charakter proudění. *V laminární mezní vrstvě se šíří teplo kondukcí, která pak i při relativně malé tloušťce klade jistý tepelný odpor. Naopak tepelný odpor turbulentní vrstvy je zanedbatelný.*

2.2.3.3 Sálání tepla – radiace

Přenos tepla radiací je uskutečňován prostřednictvím elektromagnetického záření (vlnění fotonů) o různé vlnové délce a nevyžaduje hmotné prostředí, tj. šíření je možné i ve vakuu. Podle vlnové délky se rozlišuje záření rentgenové, ultrafialové, světelné, infračervené a elektromagnetické. Největší význam má z hlediska šíření tepla radiací **infračervené záření**, neboť *je pohlcováno tělesy a jeho energie se při tom mění v energii tepelnou nebo naopak je ve formě tepelné energie z těles vyzařováno*. Každé těleso neustále tepelnou energii vyzařuje (tepelná emise), pohlcuje (absorpce), odráží (reflexe), propouští (transmise) a celý proces tak má za následek neustálé sdílení tepla mezi tělesy. Radiace je hlavním mechanismem přenosu tepla z plamenů na povrch paliva, na jiné předměty v hořícím prostoru nebo na sousední objekty.

Hustotu tepelného toku ze sálajícího tělesa vyjadřuje **Stefan-Boltzmannův zákon**, který je s určitými modifikacemi v požární praxi vyjadřován následujícím vztahem:

$$\dot{q}''_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \varnothing \cdot T^4 \quad (2.5)$$

kde: $\dot{q}''_r$ – hustota dopadajícího tepelného toku sdílená radiací (W/m^2)

ε – emisivita sálavého povrchu (-), v případě emisivity plamenů obvykle $\varepsilon = 1$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ – Stefan-Boltzmannova konstanta

T – teplota hořících plynů (K)

$\varnothing$ – polohový faktor (-), v případě plně rozvinutého požáru $\varnothing = 1$

Z předchozí rovnice je patrná **závislost hustoty tepelného toku na emisivitě sálavého tělesa** ($0 < \varepsilon \leq 1$). Jedná se o experimentálně zjišťované hodnoty měnící se s teplotou, avšak pro většinu materiálů v podmínkách požáru (teploty okolo $1\,000\text{ °C}$) se blíží jedné, tj. emisivitě absolutně černého tělesa. Pro výpočty sálání tepla plně rozvinutého požáru (např. při stanovení odstupových vzdáleností od budov) se běžně uvažuje emisivita požáru rovná jedné (ČSN 73 0802, 2009). Vyšší vyzařovací schopnost vykazují silnější vrstvy tří- a víceatomových plynů a

plyny znečištěné (např. kouřem). Naopak neznečištěné jedno- a dvouatomové inertní plyny se na přenosu tepla podílí jen minimálně. Hustota tepelného toku je kromě vlastních sálavých ploch rovněž závislá na vzdálenosti a vzájemné orientaci (úhlu) sálavé a dopadající plochy, což vyjadřuje tzv. *polohový faktor*.

2.3 Související požárnětechnická terminologie

V této kapitole jsou zmíněny základní související požárnětechnické pojmy používané v požárním kodexu českých technických norem, a to především s ohledem na návaznost následující kapitoly popisující požadavky na instalační šachty a jejich konstrukční řešení.

2.3.1 Hořlavost výrobků – třídy reakce na oheň

Hořlavost stavebních výrobků je ukazatel, jak výrobky přispívají k rozvoji a intenzitě vznikajícího požáru. Hořlavost výrobků vyjadřuje klasifikace jednotná ve státech Evropské unie, tzv. *třídy reakce na oheň* (Tab. 2.2). Stupnice o sedmi třídách A1, A2, B, C, D, E, F charakterizuje výrobky od třídy A1 – jakožto zcela nepřispívající k požáru – po třídu F – jakožto výrobky výrazně se podílející na rozvoji a intenzitě požáru.

Tab. 2.2 Třídy reakce na oheň pro výrobky s popisem chování při požáru (SP, 2003)

<i>Třída reakce na oheň</i> (ČSN EN 13501-1+A1, 2010)		<i>Chování při požáru (příklad výrobku)</i>
Nehořlavé výrobky	A1	Nepřispívají k růstu požáru a k vývoji kouře (keramika, sklo, kov, tepelněizolační deska z minerální izolace)
	A2	Nepřispívají významně k růstu požáru (sádkokartonová deska)
Hořlavé výrobky	B	Velmi omezeně přispívají k růstu požáru (cementotřísková deska)
	C	Omezeně přispívají k flashover efektu
	D	Přispívají k flashover efektu (konstrukční dřevo)
	E	Výrazně přispívají k flashover efektu (tepelněizolační desky z fasádního expandovaného polystyrenu)
	F	Nezařazené materiály do třídy A1–E nebo výrobky, u kterých nebyla stanovena vyšší třída (polystyren bez retardační úpravy)

Výrobky a materiály samy o sobě nemají žádnou požární odolnost a jsou charakterizovány právě hořlavostí. Požární odolnost dosahují tehdy, jsou-li zabudovány systémově do konstrukčního celku dle technologických postupů výrobců (např. montovaná šachtová stěna). Společně s třídou reakce na oheň se v některých případech udává a v požární legislativě vyžaduje tzv. *doplňková klasifikace* z hlediska vývoje kouře při požáru (s1, s2, s3), možnosti odkapávání (d0, d1, d2) a vývinu kyselých (agresivních) zplodin hoření (a1, a2, a3 – zejména u kabelových rozvodů). S narůstajícím číslem u klasifikace „s“ (z angličtiny „smoke“ = kouř), „d“ („droplets“ = kapky) nebo „a“ („acidity“ = kyselost) se zvyšuje tvorba doprovodných komponentů hoření, tj. nižší číslo udává požárně příznivější výrobek.

2.3.2 Požární riziko a stupeň požární bezpečnosti

Požární riziko a následně určené stupně požární bezpečnosti jsou určovány především za účelem stanovení požadované požární odolnosti pro nosné a požárně dělicí konstrukce (ČSN 73 0802, 2009).

Požární riziko pro objekty nevýrobního charakteru (bytová, občasná výstavba) představuje míru rozsahu případného požáru v posuzovaném stavebním objektu nebo jeho části (např. v požárním úseku). Dle českých technických norem charakterizuje toto riziko **požární výpočtové zatížení** p_v (kg/m^2), které obecně vyjadřuje pomyslné množství dřeva, jehož normová výhřevnost je ekvivalentní normové výhřevnosti všech hořlavých látek nacházejících se na stejné posuzované ploše. Sestává se obdobně jako u statických zatížení ze stálé a nahodilé složky požárního zatížení přenásobené součiniteli vyjadřujícími okrajové podmínky v požárním úseku, tj. rychlost odhořívání (součinitel „a“), přívod vzduchu do zóny hoření (součinitel „b“) a vliv aktivních prvků požární ochrany – požárněbezpečnostních zařízení (součinitel „c“).

Stupeň požární bezpečnosti (SPB) vyjadřuje míru požárního rizika v požárním úseku a schopnost jeho nosných a požárně dělicích konstrukcí čelit účinku požáru. Značí se římskými číslicemi „I“ (nízké požární riziko nebo i prostory bez požárního rizika) až „VII“ (vysoké požární riziko). O výši SPB rozhoduje požární výpočtové zatížení, konstrukční systém objektu (nehořlavý, smíšený, hořlavý) a jeho požární výška, tj. výška od čisté podlahy prvního nadzemního podlaží k čisté podlaze posledního užitného nadzemního podlaží.

Instalační šachty mají často rozdílné dispoziční, konstrukční a technické řešení a stanovení požárního výpočtového zatížení by bylo pro běžné výpočty nepatřičně obtížné. Z tohoto důvodu se výpočet požárního zatížení běžně neprovádí a **nejnižší SPB se určuje přímo s ohledem na druh přepravované látky a typ rozvodu v šachtě**, a to:

- nehořlavé látky v nehořlavém potrubí (třída reakce na oheň A1, A2) – I. SPB;
- nehořlavé látky v hořlavém potrubí (B až F) – II. SPB;
- hořlavé látky (včetně kabelových rozvodů) o celkovém světlém průřezu všech potrubí nejvýše $1\,000\text{ mm}^2$, při požární výšce objektu h: do 22,5 m – II. SPB, nad 22,5 m do 45 m – III. SPB, nad 45 m – IV. SPB;
- hořlavé látky o celkovém světlém průřezu všech potrubí větším než $1\,000\text{ mm}^2$, nejvýše však $8\,000\text{ mm}^2$, při požární výšce objektu h: do 45 m – IV. SPB, nad 45 m – V. SPB;
- hořlavé látky o celkovém světlém průřezu všech potrubí větším než $8\,000\text{ mm}^2$ – VI. SPB.

Pro výtahové šachty je SPB určován obdobně dle výšky objektu a dle typu výtahu (osobní, osobonákladní). Šachty pro shozy odpadků včetně prostorů, kde se odpadky shromažďují a též místnosti v jednotlivých podlažích pro shoz (přístup k šachtě) je nutné řešit jako samostatné požární úseky s min. III. SPB.

V běžných bytových instalačních šachtách bývají v dnešní době až na VZT potrubí téměř všechny instalace na bázi plastů, nejčastěji polypropylenu. Na trhu jsou však k dispozici i moderní a velice **kvalitní litinové systémy pro odvodnění budov**, které kromě dalších výhod vykazují výborné požární parametry (SAINT-GOBAIN, 2008). Vezme-li se v úvahu běžný vnitřní světlý rozměr instalační šachty $0,4 \times 0,9\text{ m}$, pak **v rámci jednoho podlaží se může nacházet v šachtě až okolo 14 kg plastů**. Je-li proveden ekvivalentní přepočít na požární zatížení dřevem, jedná se o hodnotu okolo 36 kg, jak orientačně uvádí následující tabulka:

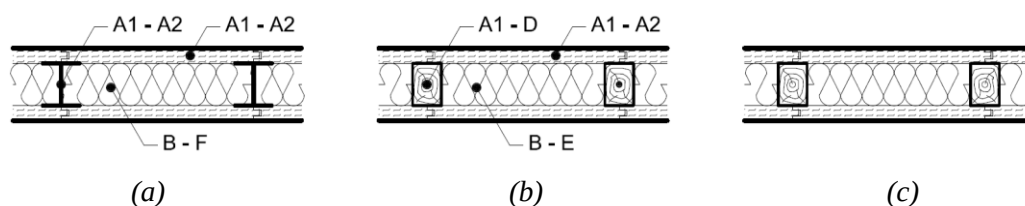
Tab. 2.3 Orientační hmotnost plastového potrubí v modelové bytové šachtě pro výšku jednoho typického podlaží s konstrukční výškou podlaží 3 m

Specifikace potrubí (použité zkratky viz poznámka)	Průměr (mm)	Tl. stěny (mm)	Hmotnost (kg/m)	Délka (m)	Hmotnost (kg)
K (pouze splašková)	D 110	2,7	1,03	3	3,09
K – přípojka WC	D 110	2,7	1,03	0,3	0,31
K – přípojka	D 50	1,8	0,31	1,2	0,37
SV	D 40	5,5	0,54	3	1,62
TV, C	D 40	6,7	0,64	6	3,84
SV, TV, C – tepelná izolace	D 80	20	0,10	9	0,90
SV, TV – přípojka (pro byt)	D 20	3,1	0,15	6	0,90
SV, TV – tepelná izolace – přípojka	D 40	10	0,03	6	0,18
T – přívod, odvod	D 25	4,2	0,25	6	1,50
T – tepelná izolace	D 65	20	0,08	6	0,48
T – přípojka	D 20	3,4	0,16	2	0,32
T – tepelná izolace – přípojka	D 60	20	0,07	2	0,14
Celková hmotnost potrubí z plastu:					13,7 kg
Přepočet hmotnosti polypropylenu na požární zatížení dřevem:					
$p = m_{PP} \cdot H_{PP} / H_D = 13,7 \cdot 45 / 17 = 36,3 \text{ kg}$					
Uvažovaná je výhřevnost pro polypropylen $H_{PP} = 45 \text{ MJ/kg}$, pro dřevo $H_D = 17 \text{ MJ/kg}$					
Poznámka: K, SV, TV, C, T = kanalizace, studená voda, teplá voda, cirkulace, topení Materiál pro K = PP-HT, polypropylen – vysokoteplotní („high temperature“), 910 kg/m ³ Materiál pro SV, TV, C, T = PP-R, polypropylen – zesíťovaný („reticular“), 910 kg/m ³ Tepelná izolace potrubí – pěnový polypropylen nezesíťovaný (Mirelon), 18–35 kg/m ³ D = vnější průměr potrubí					

2.3.3 Druh konstrukční části a požární odolnost

Z hlediska omezení vertikálního a horizontálního šíření požáru **v budovách je hlavním principem pasivní požární ochrany členění interiéru do požárních úseků**, které jsou ohraničeny požárně dělicími konstrukcemi a výplněmi otvorů v těchto konstrukcích řešenými jako požární uzávěry.

Pro nosné a požárně dělicí konstrukce se rozlišují **druhy konstrukčních částí DP1, DP2 a DP3** (Obr. 2.9), a to v závislosti na uvolněném teple z těchto konstrukcí v požadované době požární odolnosti a vlivu hořlavých hmot na stabilitu a únosnost těchto konstrukcí (ČSN 73 0810, 2009). V případě druhu konstrukce DP1 se jedná nejčastěji o zcela nehořlavé konstrukce (železobetonové, kovové, zděné apod.) nebo o vrstevnaté prvky kostrového typu s nehořlavou nosnou konstrukcí (ocelovou, hliníkovou) a nehořlavým deskovým opláštěním. Konstrukce druhu DP2 vytváří nejčastěji prvky s hořlavou nosnou kotrout (dřevěné sloupky) a nehořlavým opláštěním, které je schopné kotrout a vnitřní výplň chránit po celou dobu požární odolnosti před vzplanutím. Konstrukce druhu DP3 nevyhovují požadavkům pro DP1 a DP2 a mají naopak většinou buď nedostatečně účinné nehořlavé opláštění, nebo naopak opláštění hořlavé, případně se jedná o konstrukce s viditelnou hořlavou kotrout (např. dřevěné trámové stropy, krovy). Druhy a uspořádání konstrukcí DP1, 2 a 3 rozhodují při požárněbezpečnostním řešení staveb o konstrukčním systému budovy (nehořlavý, smíšený, hořlavý). U instalačních šachet jsou dále kladeny přímé požadavky na druh konstrukce pro opláštění a požární uzávěry (Tab. 2.4).



Legenda: A1–F = třídy reakce na oheň dílčích výrobků

Obr. 2.9 Vrstevnaté konstrukce druhu: (a) DP1 (třída A2 s omezením); (b) DP2; (c) DP3

Požární odolnost je doba v minutách, po kterou jsou schopny nosné a požárně dělicí konstrukce odolávat účinkům požáru bez porušení požadované funkce, zejména nosnosti, celistvosti a izolační schopnosti (ČSN 73 0810, 2009). V případě určení požární odolnosti zkouškou nebo výpočte jde o dobu v minutách od začátku normového požáru (Obr. 2.3 (b)) po vznik jednoho ze sledovaných mezních stavů. Mezi nejdůležitější mezní stavy patří:

- **R = nosnost** – únosnost a stabilita konstrukčních prvků – kolaps, nadměrné deformace;
- **E = celistvost** – omezení vzniku trhlin na neohřívané straně plošné konstrukce (stěny, stropy, dveře) – vznícení bavlněného polštářku či souvislé hoření na neexponované straně;
- **I = izolační schopnost** – omezení nárůstu teploty ($\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$) na neohřívaném povrchu plošné konstrukce;
- **W = radiace** – omezení tepelného toku ($\text{max. } 15\text{ kW/m}^2$) z neohřívané strany plošné konstrukce;
- **C = samouzavíratelnost** (např. samozavírač na požárních dveřích vedoucích do chráněných únikových cest);
- **S = kouřotěsnost** – snížení či vyloučení průniku kouře (např. skrz požární dveře).

Tab. 2.4 Požadovaná požární odolnost a druh konstrukce pro šachty do výšky 45 m v závislosti na stupni požární bezpečnosti - SPB (ČSN 73 0802, 2009)

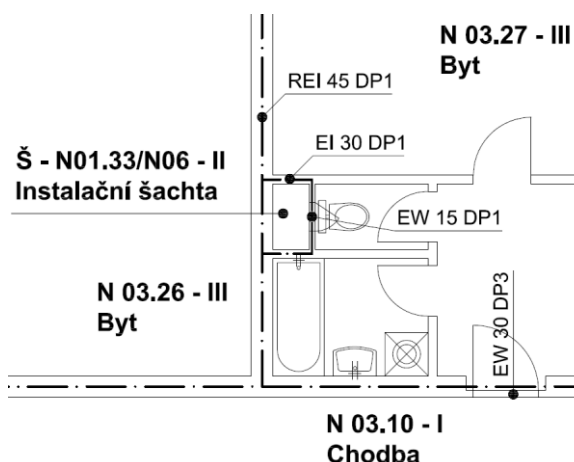
Typ stavební konstrukce	Požadovaná požární odolnost v minutách a druh konstrukce dle SPB						
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
Požárně dělicí konstrukce	30 DP2	30 DP2	30 DP1	30 DP1	45 DP1	60 DP1	90 DP1
Požární uzávěr	15 DP2	15 DP2	15 DP1	15 DP1	30 DP1	30 DP1	45 DP1

Požadovaná požární odolnost stavebních konstrukcí vychází ze SPB dotčených požárních úseků. V případě požární stěny nebo požárního uzávěru mezi dvěma požárními úseky (např. byt a instalační šachta) je rozhodující vyšší ze SPB obou požárních úseků. V případě požárního stropu (též požární přepážky v horizontálně členěných šachtách) je rozhodující SPB daného požárního úseku, nad kterým se strop nachází. **Požární odolnost stavebních konstrukcí at' již požadovanou normami nebo deklarovanou výrobcí určují:**

- **mezní stavy** (R, E, I, W atd.) nebo jejich kombinace (REI, EI, EW apod.);
- **doba v minutách** (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360 minut);
- **druh konstrukční části** (DP1, DP2 nebo DP3).

Plošná požárně dělicí konstrukce oddělující požární úseky (např. šachtové stěny) musí zůstat při požáru celistvá a zajistit izolační schopnost, tj. s mezními stavy EI, eventuálně v případě

nosných konstrukcí REI. Například prochází-li v bytovém domě instalační šachta jako samostatný požární úsek (nejčastěji II. SPB) bytovými jednotkami (nejčastěji III. nebo IV. SPB), pak je pro šachtové stěny požadována požární odolnost EI 30 DP1 a pro požární uzávěr (revizní dvířka) EW 15 DP1. Z ilustračního půdorysu bytu (Obr. 2.10) je rovněž patrné, že **na šachtovou stěnu a revizní dvířka do šachty jsou obvykle kladeny nižší požadavky na požární odolnost (30 a 15 minut) ve srovnání s požadavky na požární stěnu mezi byty či požární uzávěr do bytu (45 a 30 minut)**. Pouze v případě dvířek do šachty je kladen přísnější požadavek na druh konstrukční části DP1 (tj. kovová dvířka), ve srovnání s požadavkem DP3 na vstupní dveře do bytu, které tak mohou být celodřevěné. Tyto nižší požadavky jsou uplatňovány do výšky šachty 45 m. U šachet vyšších, případně jde-li o specifické šachty požárních či evakuačních výtahů, jsou požadavky shodné jako pro požární stěny a uzávěry v běžných požárních úsecích (ČSN 73 0802, 2009).



Obr. 2.10 Příklad půdorysu části podlaží bytového domu se zákresem hranic požárních úseků a požadované požární odolnosti stavebních konstrukcí; bytová instalační šachta řešená jako samostatný požární úsek

2.4 Pasivní a aktivní požární ochrana instalačních šachet

Pasivní a aktivní požární ochrana jsou dva základní pilíře, na nichž je obecně postavena koncepce požární bezpečnosti staveb a jejichž cílem je maximálně omezit šíření účinků případného požáru v budovách.

Pasivní požární ochrana je základní schopností budovy jako celku vzdorovat požáru díky dispozičnímu a konstrukčnímu řešení. Jedná se zejména o členění objektu do požárních úseků, použití vyhovujících výrobků a stavebních konstrukcí z hlediska jejich reakce na oheň a požární odolnosti, řešení únikových cest a odstupových vzdáleností mezi objekty apod.

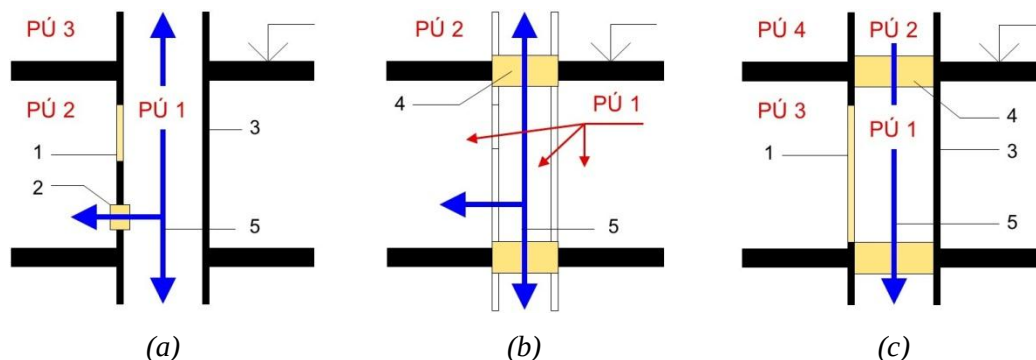
Aktivní požární ochrana doplňuje ochranu pasivní budovy o systém požárněbezpečnostních zařízení, který samočinně nebo řízeně reaguje a likviduje, případně snižuje účinek vznikajícího požáru v jeho počáteční iniciační fázi (Obr. 2.3).

V rámci instalačních šachet je ve většině případů využíváno pasivního způsobu požární ochrany, a proto je v následujících kapitolách věnována pozornost zejména konstrukčnímu řešení šachet, svislému opláštění, revizním otvorům a instalačním prostupům. V závěru kapitoly jsou shrnuty možnosti aktivní požární ochrany.

2.4.1 Konstrukční řešení instalačních šachet

Instalační šachty mohou být z hlediska pasivní požární ochrany řešeny ve třech základních konstrukčních variantách, a to jako *šachty průběžné, horizontálně členěné v úrovni požárních stropů a šachty kombinované*.

Průběžná instalační šachta (Obr. 2.11 (a)) vytváří po své výšce samostatný požární úsek – „komín“ oddělený od navazujících prostor požárně dělící konstrukcí (šachtovou stěnou) a požárními uzávěry (dvířky) v rámci revizního přístupu k instalacím. Prostupy instalací šachtovou stěnou musí být požárně utěsněny.



Legenda: 1 = požární uzávěr, 2 = požární utěsnění instalací, 3 = šachtová stěna s požární odolností, 4 = požární přepážka v úrovni stropu, 5 = instalace, PÚ = požární úsek

Obr. 2.11 Varianty konstrukčního řešení instalačních šachet:
(a) průběžná šachta; (b) horizontálně členěná šachta; (c) kombinovaná šachta

Bytové instalační šachty se často doplňují betonovými přepážkami v úrovni stropů, jejichž úkolem je především eliminace akustických mostů a šíření oděru mezi jednotlivými podlažími. Není-li v přepážce provedeno patřičné požární utěsnění instalačních prostupů, jedná se z požárního hlediska stále o průběžný typ instalační šachty a tato konstrukční úprava může pak jen částečně „brzdit“ vertikální šíření požáru šachtou.

Horizontálně členěná instalační šachta (Obr. 2.11(b)) spočívá v provedení požárních přepážek v instalačním prostoru v úrovni požárních stropů. Instalační prostor se tak stává součástí požárního úseku (např. bytové jednotky), kterým prochází na rozdíl od průběžných šachet, kdy je instalační prostor a sousední prostor (např. byt) vzájemně požárně oddělen. Šachtová stěna, revizní dvířka a instalační prostupy jsou v této konstrukční variantě bez požárních požadavků.

Stropní požární přepážky jsou nejčastěji realizovány jako železobetonové s požárně utěsněnými instalačními prostupy. Alternativou může být tzv. **sdružený prostup** využívající tuhé desky z minerální vlny a intumescentní (zpěňující) prvky na jejím spodním líci (Obr. 2.16 (a)). Stropní přepážky bez požárního utěsnění požárně neoddelí jednotlivá patra a tuto konstrukční úpravu nelze chápat jako šachtu horizontálně členěnou. Velkým problémem u těchto šachet bývá nepřístupnost požárních přepážek. Jsou-li pak v rámci oprav nebo rekonstrukcí domu měněny rozvody, k znehodnoceným ucpávkám nebývá přístup, nejsou tak opraveny a stav šachty se stává z požárního hlediska nevyhovující.

V objektech vyšších než 45 m s instalacemi schopnými šířit požár se šachty musí řešit jako horizontálně členěné se vzdáleností přepážek max. 22,5 m s požadovanou požární odolností

nejméně EI 30 DP1. Pro šachty bez přepážek a s možností vertikálního šíření zplodin hoření se dále požaduje samočinné požární odvětrání v nejvyšší části šachty s přívodem v části nejnižší (ČSN 73 0802, 2009).

Kombinovaná instalační šachta (Obr. 2.11 (c)) propojuje obě předchozí konstrukční řešení. Šachtový prostor je požárně oddělen jak ve vertikálním směru, tak členěn stropními přepážkami ve směru horizontálním a po své výšce je v jednotlivých podlažích členěn do požárních úseků.

Kombinované konstrukční řešení šachet se v praxi často využívá u elektroinstalačních šachet ve společných částech bytových domů, tj. na únikových cestách (schodiště, chodby), s cílem snížit požadavky na požární uzávěry a tím i finanční náklady stavby. Šachtový prostor musí být každopádně vždy požárně oddělen od únikové cesty ve svislém směru. Je-li šachta členěna v úrovni stropu, revizní dveře mohou být řešeny celodřevěným požárním uzávěrem druhu DP3 jako pro běžný požární úsek, zatímco u průběžné šachty by musely být dveře kovové druhu DP1.

Horizontálně členěné a kombinované instalační šachty ve své podstatě již šachtami nejsou, avšak chybné konstrukční řešení nebo absence požárních ucpávek vrací těmto prostorům během požáru rychle šachtový charakter.

2.4.2 Těsnění instalačních prostupů v požárně dělicích konstrukcích

Požární těsnění instalačních prostupů na hranici požárního úseku hraje klíčovou roli z hlediska šíření požáru v objektu ve svislém i vodorovném směru, a to zejména u instalací na bázi plastů (potrubí, kabely), které jsou charakteristické:

- vysokou hořlavostí;
- výrazným vývojem zplodin hoření (kouř, toxické plyny);
- možností odkapávání hořící roztavené hmoty;
- rychlou ztrátou tuhosti (zejména kanalizační potrubí větších průřezů).

Těsnicí požární systémy jsou vyvíjeny i pro nehořlavá potrubí (např. ocelové či plechové potrubí), kde sice nehrozí ztráta tuhosti a odhoření instalace, ale rizikové jsou zejména vysoké povrchové teploty rozžhaveného potrubí na odvrácené (chráněné) straně požárně dělicí konstrukce.

2.4.2.1 Požární most

Místo instalačního prostupu požárním stropem nebo stěnou představuje lokální narušení požárně dělicí funkce, tj. z hlediska mezních stavů požární odolnosti konstrukce jde o narušení celistvosti (mezní stav E) a izolační schopnosti (mezní stav I). Kvalitní a hlavně funkční zajištění těchto „slabých“ míst je nezbytné pro eliminaci rizika vzniku jevu, který můžeme nazvat **„požární most“**, zcela obdobně jako je tomu ve stavební fyzice u mostů tepelných, vlhkostních nebo akustických.

Obdobně mohou požární mosty vznikat v plošných požárně dělicích konstrukcích v místě dilatačních a konstrukčních spár. Po odhoření požárně neutěsněné instalace zůstává v konstrukci otvor, kterým se mohou dále šířit zplodiny hoření, prošlehávat plamen, či dokonce nastat trvalé plamenné hoření na straně odvrácené od požáru (Obr. 2.12).



Obr. 2.12 Princip vzniku požárního mostu v místě prostupu plastového potrubí požárně dělicí konstrukcí

2.4.2.2 Legislativní požadavky pro těsnění instalačních prostupů

Systémově utěsněný prostup (ucpávka) musí vykazovat požární odolnost shodnou s požární odolností konstrukce, ve které se ucpávka nachází, a to včetně mezních stavů. Nepožaduje se však požární odolnost vyšší než 90 minut. Například v nosné požární stěně s mezními stavy REI (případně v nenosné požární přičce EI) musí mít ucpávka rovněž parametry EI (ČSN 73 0810, 2009). Ucpávky zajišťují zpravidla hořlavé instalace, a to nejčastěji pro:

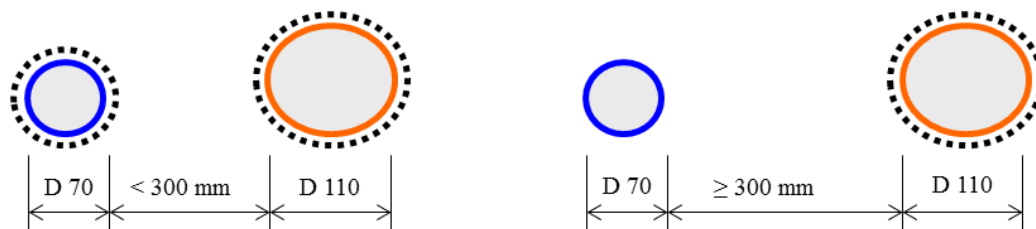
- potrubí kanalizace** (třída reakce na oheň B až F) světlého průřezu $> 8\,000\text{ mm}^2$ ($\varnothing > 100\text{ mm}$) v případě vertikálního potrubí a světlého průřezu $> 12\,500\text{ mm}^2$ ($\varnothing > 126\text{ mm}$) v případě horizontálního potrubí;
- potrubí s trvalou náplní vody** či jiné nehořlavé látky (B až F) světlého průřezu $> 15\,000\text{ mm}^2$ ($\varnothing > 138\text{ mm}$);
- potrubí k rozvodu vzduchu** stlačeného, nestlačeného vzduchu nebo jiných nehořlavých plynů včetně VZT rozvodů (B až F) světlého průřezu $> 12\,000\text{ mm}^2$ ($\varnothing > 123\text{ mm}$);
- kabelové rozvody** tvořené svazkem vodičů, pokud prostupují jedním otvorem, mají izolace (povrchové úpravy) šířící požár a jejich hmotnost je větší než 1 kg/m .

U potrubí menších průměrů, než je uvedeno u předchozích bodů a) až c), nebo pokud jde o nehořlavá potrubí, **postačí dotěsnění prostoru mezi požárně dělicí konstrukcí a instalací nehořlavou hmotou** (např. dobetonování) tak, aby byla zajištěna celistvost a požární odolnost konstrukce. Zcela nepřípustné je dopěnění prostupu montážní polyuretanovou pěnou nebo obdobné úpravy. V případě požárních polyuretanových pěn, které samy o sobě nejsou součástí systémové ucpávky, použitelnost také není možná, jelikož tyto pěny vykazují třídu reakce na oheň B. Pro hořlavá potrubí dle předchozích bodů a), b) platí dále tyto důležité zásady:

- **realizace ucpávek vždy v případě prostupu do chráněné únikové cesty**, tj. bez ohledu na průřezovou plochu;
- **pro vybrané provozy jsou nejmenší průřezové plochy poloviční** (například shromažďovací prostory, zdravotnické stavby, objekty s více jak 20 nadzemními podlažími);
- **realizace ucpávek pro vzájemně „blízké prostupy“** (Obr. 2.13) vzdálené $< 300\text{ mm}$ a světlého průřezu $> 2\,000\text{ mm}^2$ ($\varnothing > 50\text{ mm}$).

Při výměnách instalací ve stávajících objektech dochází velmi často k mylné interpretaci stavebního zákona (Zákon č. 183 Sb., 2006), který v § 103 stanoví, že vedení technického zařízení budov a jejich stavební úpravy nevyžadují stavební povolení ani ohlášení. Je nutné zdůraznit, že úpravou nesmí dojít ke snížení požární bezpečnosti stavby. Nedílnou součástí projektové dokumentace stavby pro stavební povolení nebo ohlášení je požárněbezpečnostní řešení, které specifikuje v případě instalačních rozvodů požadavky na požární utěsnění rozvodů. Není-li tato dokumentace zpracována, nemá Hasičský záchranný sbor ČR možnost se k projektu

vyjádřit a existuje značné riziko vadného konstrukčního provedení. Často jsou navíc při výměnách stávajících instalací nahrazovány nehořlavé instalace (např. ocelové nebo litinové) za instalace hořlavé, a pokud nejsou právě zejména instalační prostupy provedeny správně, dochází ke zhoršení požární bezpečnosti. Zodpovědnost v tomto případě nese především projektant.



Obr. 2.13 „Blízké prostupy“ dvou hořlavých potrubí požárním stropem; tečkovaně vyznačena požadovaná požární ucpávka v závislosti na průměru a vzdálenosti potrubí

2.4.2.3 Požární ucpávky – systémová těsnění instalačních prostupů

Jak z názvu vyplývá, cílem ucpávek je uzavřít (ucpat) otvory v požárně dělicích konstrukcích potřebných pro průchod kabelových a trubních instalací při požáru. **Ucpávky využívají tzv. intumescentní materiály**, které zvětšují svůj objem (napěňují), jsou-li vystaveny vysokoteplotnímu namáhání. Používány jsou intumescentní tmely, stěrky, pěny, lamináty, grafit apod. Podle toho, jaký otvor a jaké prvky jsou těsněny, lze rozlišit následující typy ucpávek:

- **měkké ucpávky** – minerální izolace s povrchovými intumescentními tmely či nátěry;
- **tvrdé ucpávky** – požární malty a cihličky;
- **rozebíratelné ucpávky** – manžety, sáčky (pytlíky), elastické cihličky a zátky;
- **speciální ucpávky** – flexibilní prvky pro náročné aplikace.

Lze se setkat s názory, proč prostupující instalace složitě a nákladně těsnit, když by postačilo prostupující prvky jednoduše a levně dozdít či obetonovat. Dále jsou uvedeny charakteristické vlastnosti požárních těsnicích systémů (ucpávek), jejichž nevyužití by mohlo znamenat riziko vzniku požárního mostu:

- **schopnost uzavření prostupu** v požárně dělicí konstrukci v případě odhoření instalace, čímž je zamezeno dalšímu šíření účinků požáru do sousedního požárního úseku;
- **omezení povrchových teplot** nehořlavého potrubí na odvrácené straně požárně dělicí konstrukce díky tepelněizolačnímu efektu ucpávky;
- **možnost dilatačních pohybů** instalací prostupujících ucpávkou;
- **možnost výměny nebo doplnění instalací** během životnosti objektu. Ucpávky jsou konstruovány tak, aby je bylo možné v případě potřeby jednoduchým způsobem rozebrat, případně do nich vyříznout otvor pro novou instalaci a následně je opět uvést do funkčního stavu.

Pro možnost kvalitní montáže ucpávek, případné opravy, kontroly při kolaudacích a každoročních revizí je nezbytná přístupnost instalačních prostupů. Budou-li ucpávky po jejich montáži nepřístupné nebo zakryté (např. keramickým obkladem), velice důležitá je **dokumentace skutečného provedení, tzv. pasportizace ucpávek**, která pak snadno poslouží jako podklad pro kolaudaci, revizní kontroly či opravy. Ucpávky musí být prováděny proškolenou montážní firmou daného požárního systému. Každá ucpávka musí mít svou „identitu“, tj. musí být

označena identifikačním štítkem (Obr. 2.15 (a)) s údaji obsahujícími zejména hodnotu požární odolnosti ucpávky, typ ucpávky, datum provedení, informace o montážní firmě a označení výrobce systému. Právě chybně těsněné instalační prostupy (Obr. 2.14) bývají častou kolaudační závadou, předmětem zdoluhavých reklamací a nevyhovujících revizních kontrol.



(a)

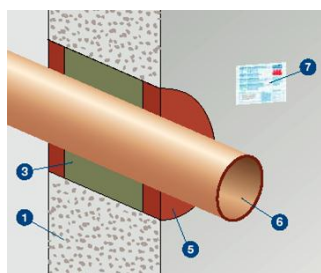


(b)

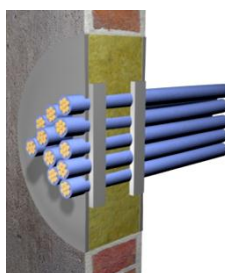
Obr. 2.14 Příklady chybného řešení instalačních prostupů – potencionální požární mosty:
(a) pěnový polystyren a montážní pěna kolem kanalizačního potrubí v místě prostupu šachtovou stěnou; (b) dřevěná deska (bednění) v místě prostupu kabelů požárním stropem

2.4.2.4 Měkké ucpávky a sdružené prostupy

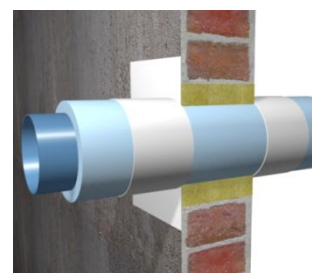
Měkké ucpávky jsou **tvořeny nehořlavým jádrem z minerální vlny a intumescentním (zpěňujícím) tmelem či stěrkou**, které při tepelné expozici expandují pod vysokým tlakem, opřou se o jádro z minerální vlny a jsou tak schopné uzavírat odhořívající části instalace z plastických hmot. Měkké ucpávky jsou používány i na kovová potrubí (Obr. 2.15 (c)), kdy povrchová intumescentní stěrka je přetažena obvykle alespoň 150 mm za líc konstrukce na tepelnou či zvukovou potrubní izolaci. Měkké ucpávky se realizují pro plastová potrubí obvykle do průměru 50 mm (D 50), kde jsou intumescentní hmoty spolu s minerální vlnou ještě schopny fungovat. U větších profilů potrubí je nutné použít jiný systém těsnění, nejčastěji požární manžety.



(a)



(b)

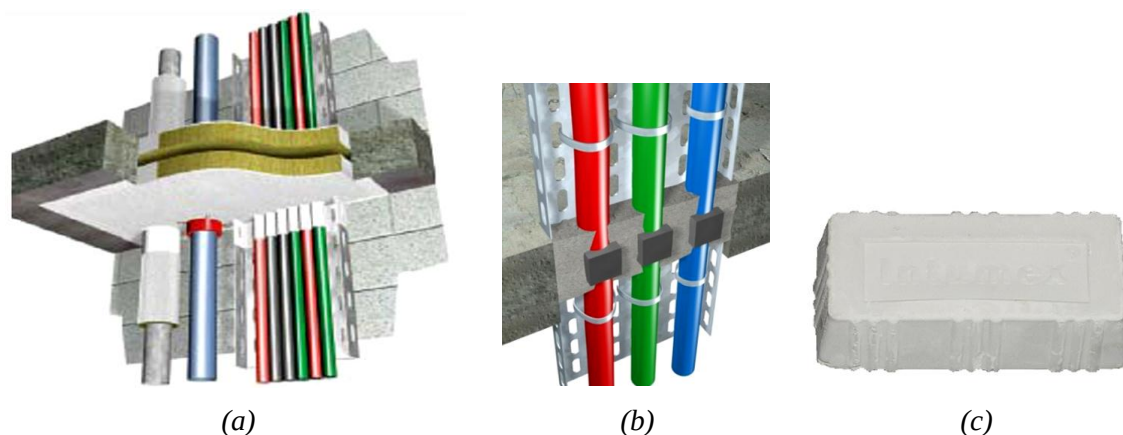


(c)

Obr. 2.15 Měkké ucpávky s možností aplikace pro: (a) hořlavá potrubí (Promat®, 2011); (b) kabelové svazky; (c) nehořlavá potrubí (Intumex®, 2009)

Pro horizontálně členěné instalační šachty je možné řešit požární přepážku v úrovni požárního stropu jako tzv. **sdružený instalační průstup** (Obr. 2.16 (a)). Využito je měkké ucpávky, kterou mohou prostupovat všechny instalace běžně se v šachtách vyskytující, tj. hořlavá potrubí pro kanalizaci, vodovod, vytápění, kovová potrubí například pro požární vodovod a VZT, kabely apod. Obvykle dvě tuhé desky z minerální vlny tl. 50 mm jsou nařezány na míru do instalačního prostupu ve stropě. Na spodní líc desek je nanášena celoplošně intumescentní nebo ablativní (žáruvzdorná) stěrka s určitým přesahem na navazující požární strop a na prostupující kabely a

kovová potrubí. V šachtách standardních průřezů je měkká ucpávka samonosná, u šachet větších průřezů (cca > 1,5 m) je nutné statické dělení instalačního prostoru a vytvoření podpůrné konstrukce po konzultaci s výrobcem ucpávky. V případě prostupu hořlavého potrubí průřezu nad D 50 bývá toto potrubí opatřeno požární manžetou (viz další kapitola), a to v případě stropní přepážky pouze ze spodní strany, u svislé stěnové přepážky oboustranně. U tohoto typu ucpávky se v praxi vyskytly akustické problémy, a to v případech, kdy byl sdružený vstup aplikován jako dno instalační šachty v požárním stropě nad garážemi v podzemním podlaží. **Při větší ploše prostupu a zdroji hluku může měkká ucpávka působit jako rezonující membrána a zhoršit tak akustický komfort** chráněných prostor (např. bytů).



Obr. 2.16 (a) sdružený instalační vstup použitelný pro požární přepážku u horizontálně členěných šachet; (b) tvrdá požární kabelová ucpávka složená z vnitřního intumescentního tmele a výplňové požární malty; (c) požární cihlička na bázi sádry pro dozdění větších vstupů (Intumex®, 2009)

2.4.2.5 Tvrdé ucpávky

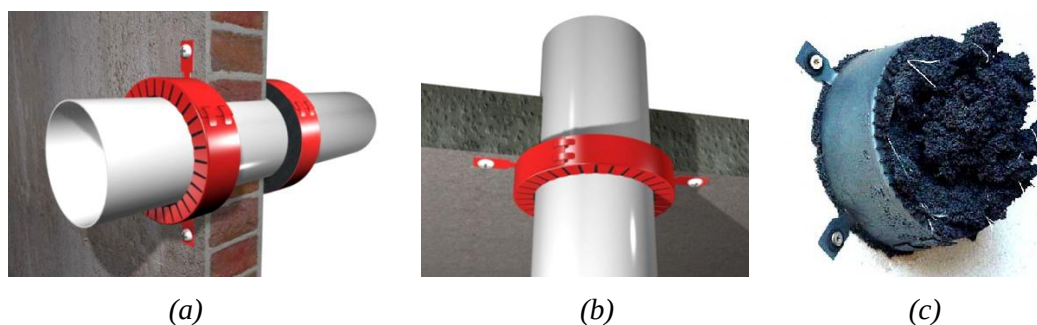
Tvrdé ucpávky jsou **obvykle aplikovány na kabelová vedení s předpokládanou dlouhodobou instalací**. U menších vstupů se většinou pevná ucpávka zhotoví s použitím speciální požární malty, která si v případě požáru zachovává celistvost. Intumescentním tmelem je bezprostředně zajištěno okolí kabelu uvnitř ucpávky, zbytek otvoru je vyplněn maltou (Obr. 2.16 (b)). U otvorů větších rozměrů prostupu je možné použití tvarovek, například cihličky na bázi sádry, vyzděných na požární maltu (Obr. 2.16 (c)). Pevné ucpávky se využívají zejména v exponovaných provozech vystavených klimatickým vlivům či jinak agresivnímu prostředí, nebo všude tam, kde může docházet k mechanickému poškození. Ucpávka vytváří vodotěsné a plynotěsné řešení, které svými pevnostními parametry umožňuje použít ucpávku v pochůzných nebo pojízdných podlahových konstrukcích.

2.4.2.6 Rozebíratelné ucpávky

Mezi rozebíratelné ucpávky patří především požární **manžety, wrapy, sáčky (pytlíky), elastické cihličky a zátky**. Jejich výhodou je především snadná a rychlá demontáž, doplnění, oprava či výměna instalace a opětovné použití ucpávky.

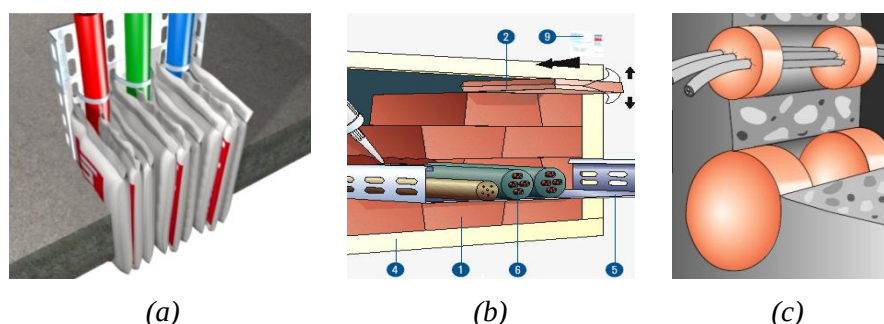
Požární manžety jsou prvky navlékané na hořlavá plastová potrubí průměru 50 až 250 mm. Intumescentní výplň manžety na bázi zpěnitelných grafitů nebo speciálních laminátů je schopná při tepelné expozici vyvinout vysoký svěrný tlak, který měknoucí potrubí „přeštípne“ a zabrání tak šíření požáru do soudního požárního úseku. Velikost manžety je určována buď dle průměru

potrubí, popř. jsou využívány manžetové pásy („nekonečná“ manžeta), ze kterých je možné přímo na stavbě vytvořit manžetu potřebného průměru. Do požárních stěn se manžety na potrubí osazují oboustranně, v případě prostupu potrubí požárním stropem ze spodního líce (Obr. 2.17). Před vlastním osazením manžety se mezery mezi potrubím doplní nehořlavým materiálem (např. maltou, betonem). Vzhledem k vysokému expanznímu tlaku manžet je nutné mechanické zakotvení manžet do konstrukce, a to vždy s použitím nehořlavých kotevních prvků (kovových hmoždinek). Obdobou manžet je dnes stále častěji používán **systém intumescentních pásů omotaných i v několika vrstvách kolem potrubí** a vsunutých do instalačního prostupu (např. systém Intumex WRAP).



Obr. 2.17 Požární manžeta na hořlavém potrubí: (a) oboustranně na požární stěně; (b) jednostranně na spodním líci požárního stropu; (c) napěněná výplň manžety (Intumex®, 2009)

Požární sáčky, elastické cihličky a zátky jsou dalším typem snadno rozebíratelných ucpávek používaných především na kabelových trasách. Funkční náplň sáčků bývají směsi inertního kameniva (vermikulit, expandovaný perlit) a zpěnitelného grafitu, nebo intumescentní sypké směsi s aditivu, případně i s přídavkem minerálních vláken nebo písku. Elastické cihličky a zátky jsou vyráběny nejčastěji z elastického požárního polyuretanu. Zátky slouží většinou k prostupu menšího počtu kabelů nebo jsou používány jako tzv. **slepá ucpávka**, tj. bez propustujícího prvku. Tyto systémy se skládají na sucho kolem propustující instalace a jsou využívány ve stěnách i střepech (Obr. 2.18).

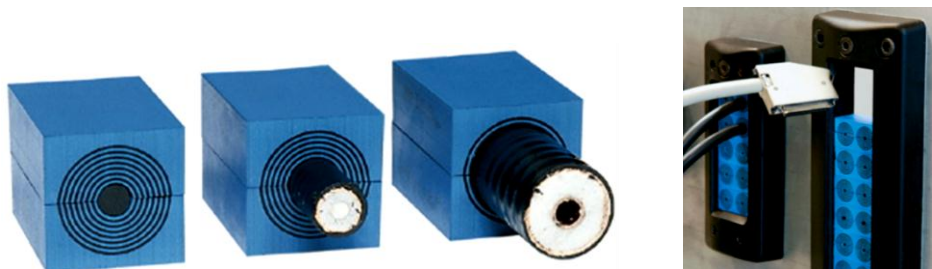


Obr. 2.18 Rozebíratelné ucpávky: (a) požární sáčky (Intumex®, 2009); (b) elastické cihličky z požárního polyuretanu (Promat®, 2011); (c) požární zátká – slepá ucpávka (systém Hilti)

2.4.2.7 Speciální ucpávky

Specifické provozy (např. energetický a chemický průmysl, dopravní stavby, telekomunikační provozy) si žádají speciální, vysoce spolehlivé a flexibilní prvky zejména pro těsnění kabelů (silových, optických, datových). Jako příklad může být uveden modulární systém pružných

tvarovek umožňující průchod kabelů různého průměru, které se vkládají do ocelového rámu zakotveného do požárně dělicí konstrukce (Obr. 2.19).



Obr. 2.19 Modulární požární ucpávka pro kabelové rozvody (systém Roxtec)

2.4.3 Vzduchotěsnost požárních ucpávek v pasivních domech

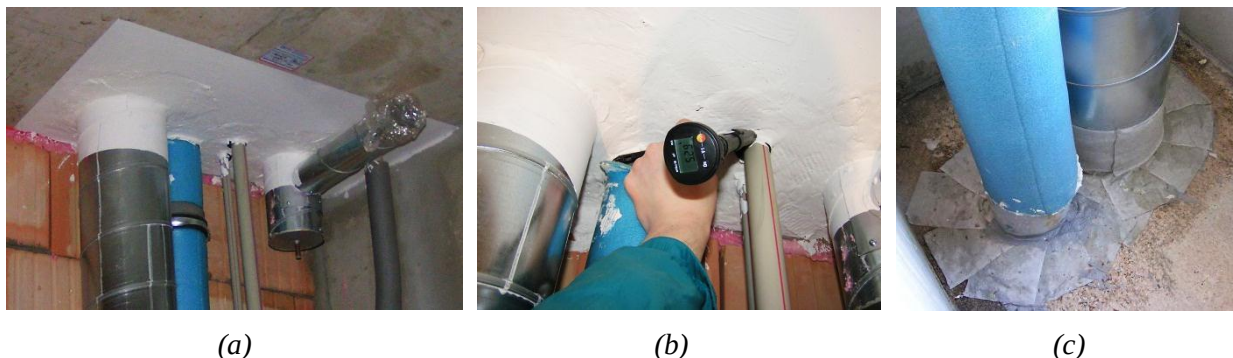
Se snižováním energetické náročnosti nízkoenergetických a zejména pak pasivních staveb nedílně souvisí jejich vzduchotěsnost, která je však dosud v České republice málo řešeným problémem. Výsledky měření jsou obtížně dostupné a není zřejmé, jaké úrovně vzduchotěsnosti lze dosahovat v reálných podmínkách, jak se liší celková vzduchotěsnost budovy od vzduchotěsnosti dílčích částí (např. bytů), jaké jsou typické netěsnosti a jejich relativní podíl na celkové vzduchotěsnosti. Požadavky na vzduchotěsnost (průvzdušnost) jsou kladeny buď pro budovu jako celek, nebo v případě bytových domů pro obytnou část (ČSN 73 0540-2, 2011), tj. řešeny nebývají společné části domu, komerční prostory, hromadné garáže apod. Vzduchotěsnost může být v krajním případě v bytovém domě řešena i v rámci jednotlivých bytů, avšak zde nejsou definovány legislativní požadavky.

Aktuálně prováděný výzkum a měření „in situ“ (Novák, 2011) v rámci nové výstavby pasivních bytových domů konstatují, že **požární ucpávky mohou vytvářet slabé místo z hlediska vzduchotěsnosti posuzované obálky**. Přetlaková zkouška (blower door test) byla prováděna v bytové jednotce s instalační šachtou horizontálně členěnou v úrovni stropní konstrukce pomocí měkké požární ucpávky z tuhé minerální vlny a povrchové intumescentní stěrky (Obr. 2.20 (a), (b)). Toto jinak z požárního hlediska funkční řešení představuje z hlediska vzduchotěsnosti řešení značně problematické, a to zejména kvůli drobným netěsnostem kolem prostupu potrubí a trhlínkám v ploše stěrky, kterými může proudit vzduch a docházet tak k tepelným ztrátám. Situaci lze sice částečně řešit například opětovným dotmelením problematických míst, ale je nutné si na druhou stranu uvědomit, že měkká ucpávka je certifikovaným systémem, za který nese garance montážní firma, a do ucpávky již jiný subjekt nemá zasahovat. Dalším problémem jsou neustále dilatační pohyby potrubí, čímž hrozí opětovné narušení zatmelených míst a vznik nových trhlinek v ploše stěrky.

Vhodnějším řešením je proto, na rozdíl od měkké ucpávky, klasická betonová stropní přepážka v šachtě, kde lze vstup potrubí na horním betonovém povrchu opatřit flexibilním vzduchotěsným oblepem (Obr. 2.20 (c)) a spodní povrch opatřit standardní požární ucpávkou. Nevýhoda tohoto konstrukčního řešení však spočívá v problematickém přístupu k potrubním vstupům v případě každoročních revizních kontrol nebo oprav při výměně instalací. U požárních ucpávek osazených zdola stropní přepážky je potřebný revizní otvor pod stropem, zatímco u vzduchotěsných oblepů osazených shora přepážky je revizní otvor vhodný co nejbližší podlaze.

Optimálním řešením dané situace je šachta řešená z požárního hlediska jako průběžná (Obr. 2.11 (a)), u které se betonové stropní přepážky v úrovni stropu ponechají, aby vyřešily problémy vzduchotěsnosti, akustiky nebo hygieny. Požární ucpávky jsou tak řešeny ve svislé požárněodolné šachtové stěně, vzduchotěsné oblepení potrubí je pak možné realizovat ze spodní strany betonové přepážky a požární revizní dvířka větších rozměrů se mohou osadit jednostranně pod stropní konstrukci.

Závěrem je účelné zdůraznit, že **požadovaným požárním parametrem u ucpávek není jejich vzduchotěsnost**, ale celistvost (mezni stav požární odolnosti E) a izolační schopnost (mezni stav I) v případě požáru.



Obr. 2.20 Vzduchotěsnost v místě instalačních prostupů v šachtě: (a) pohled na spodní líc měkké ucpávky (sdružený prostup); (b) měření rychlosti proudění vzduchu v místě netěsnosti kolem potrubního prostupu; (c) pohled na horní líc prostupu potrubí kanalizace a VZT na střechu objektu se vzduchotěsným oblepem (Novák, 2011)

2.4.4 Šachtové stěny s požární odolností

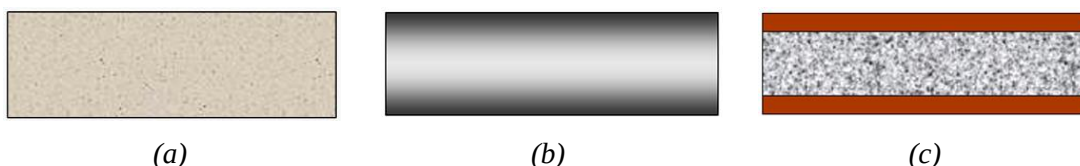
Šachtové stěny s požární odolností jsou požárně dělicími konstrukcemi pro **opláštění průběžných šachet**. Jak již bylo uvedeno, horizontálně členěný šachtový prostor (Obr. 2.11) je součástí požárního úseku, kterým prochází, a jako šachta se tedy neuvažuje. Obdobně kombinované konstrukční řešení šachet vytváří požární úseky v každém patře a nejedná se o šachtu.

Konstrukčně jsou šachtové stěny nejčastěji řešeny jako **vyzdívané z příčkových tvárnic (plné, dutinové) nebo montované s využitím požárních deskových obkladů kotvených do kovových roštů**. Základními požadavky na šachtové stěny jsou:

- jednostranná montáž;
- požární odolnost 30, 45, 60 nebo 90 minut (výjimečně vyšší) z obou stran;
- druh konstrukce DP1, případně DP2 (I. a II. SPB);
- revizní dvířka nebo dveře s požární odolností 15, 30 nebo 45 minut – požární uzávěr;
- požární utěsnění konstrukčních spár, tj. styk šachtové stěny s navazující požárně dělicí konstrukcí;
- mechanická odolnost a stabilita – většinou jde o subtilní konstrukce;
- tepelnětechnické a akustické požadavky apod.

Vyzdívané šachtové stěny jsou nejčastěji prováděny z keramických dutinových příčkovek nebo z příčkovek na bázi lehčeného betonu, tj. z nehořlavých materiálů. Příčkovky i při své relativně malé tloušťce dosahují skutečné požární odolnosti běžně podstatně vyšší, než je požadováno (Tab. 2.4). **Keramické dutinové systémy typu THERM vyžadují pro deklaraci požární odolnosti oboustrannou omítku.** Omítka se z vnitřní strany šachty standardně neprovádí a ve své podstatě technicky provést ani nelze. V důsledku tato skutečnost znamená nedodržení okrajových podmínek, za kterých výrobce systém požárně zkoušel a za kterých je požární odolnost deklarována. V případě pórobetonového zdiva Ytong výrobce deklaruje požární odolnost bez povrchové úpravy, a použitelnost tudíž konfliktní není.

Montované systémy šachtových stěn využívají požárních deskových obkladů, které jsou kotveny do pomocného kovového roštu (sloupky, paždíky) nebo přímo do navazující požární dělicí konstrukce přes okrajový kotevní profil – samonosné stěny. Různá požární odolnost je docílena kvalitou a počtem jednotlivých desek a běžně jsou nabízeny systémy s požární odolností od EI 30 DP1 do EI 90 DP1, případně i EI 120 DP1. Požární deskové obklady používané nejen pro opláštění šachtových stěn lze rozdělit z hlediska struktury na desky s homogenní a nehomogenní strukturou a desky sendvičové (Kupilík, Konstrukce pozemních staveb – Požární bezpečnost staveb, 2009).



Obr. 2.21 Požární desky: (a) s homogenní strukturou; (b) s nehomogenní strukturou; (c) sendvičové

Desky s homogenní strukturou jsou vyráběny z jedné základní materiálové směsi, která může dále obsahovat minerální, skelná či jiná rovnoměrně rozptýlená vyztužující vlákna. Jedná se zejména o desky na bázi vápenosilikátové (Promatect), vermikulitové (Grenamat) nebo sádrovláknité (Fermacell).

Desky s nehomogenní strukturou jsou sice vyráběny obvykle v jedné výrobní operaci ze stejné směsi, ale v důsledku výrobní technologie mají nehomogenní strukturu a tvoří přechod mezi deskami homogenními a sendvičovými. Jádru desky bývá obvykle řidší, s menší objemovou hmotností a plynule k povrchu desky se materiál zhušťuje. Na povrchu pak bývá deska tvrdá a kompaktní – např. cementotřískové desky (Cetris).

Desky sendvičové jsou v praxi nejvíce využívány. Vnitřní jádro je oboustranně zpevněno povrchovými pláštěmi z odlišného, obvykle vyztuženého materiálu. Jedná se zejména o desky sádrokartonové (Rigips RF), sádrovláknité (Knauf Fireboard) nebo desky na bázi cementu (Knauf Aquapanel).

2.4.5 Požární uzávěry v šachtových stěnách

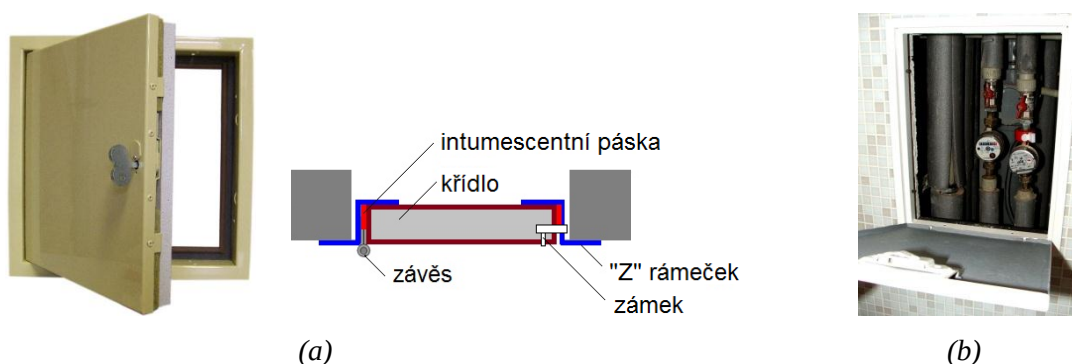
V šachtových stěnách řešených jako požárně dělicí konstrukce musí být v rámci revizního přístupu k instalacím řešeny všechny otvíravé části (dveře, dvířka) jako požární uzávěry s požadovanou požární odolností (Tab. 2.4). Z hlediska druhu konstrukce jsou v průběžných šachtách od III. SPB vyžadovány uzávěry druhu DP1, tj. kovové požární uzávěry. Pro I. a II.

SPB jsou dovoleny uzávěry DP2, avšak ty se na trhu v podstatě nevyskytují. Druh konstrukce DP3 pro uzávěry průběžných šachet není přípustný.

Z hlediska mezních stavů požární odolnosti jsou používány následující dva typy uzávěrů (ČSN 73 0810, 2009):

- **EI - S – požární uzávěry bránící šíření tepla** s těsněním proti průniku kouře osazované do chráněných únikových cest;
- **EW – požární uzávěry omezující šíření tepla** osazované mimo chráněné únikové cesty (např. z šachty do bytové jednotky).

Spára mezi křídlem a rámem požárního uzávěru vytváří potencionálně slabé místo jak z hlediska celistvosti (mezní stav E), tak z hlediska izolační schopnosti (mezní stav I). Po obvodě křídla uzávěru bývá integrována **intumescentní páska** (Obr. 2.22), která v případě tepelné expozice vypění a spáru utěsní a tepelně izoluje. Na stavebním trhu jsou běžně k dispozici uzávěry s požární odolností 15–90 minut, v případě uzávěru typu EI až 120 minut. Pro uzávěry typu EI jsou limitovány mezní teploty na neohřívaném povrchu (mezní stav I) a křídla uzávěrů tak bývají masivnější, nejčastěji včetně integrované požární desky nebo izolace. Naopak uzávěry typu EW jsou limitovány nikoliv teplotou, ale méně přísným kritériem tepelného toku procházejícího křídlem. Uzávěry jsou tak subtilnější a často stačí jen určitá tloušťka plechu s vnitřní intumescentní povrchovou úpravou směrem do šachty (Obr. 2.22 (b)).



Obr. 2.22 Požární uzávěry pro zděné šachtové stěny: (a) typ EI 40 DP1-S (foto KLIMONT GLOBAL s. r. o.); (b) typ EW 30 DP1

Šachtové požární uzávěry jsou v rámci realizace a užívání stavby podobně problematické jako požární ucpávky a **lze se setkat s třemi základními nedostatky:**

- požadován je požární uzávěr, ale osazena jsou **revizní dvířka bez požární odolnosti**;
- požární uzávěr má **nevyhovující požární odolnost** (mezní stavy, minuty nebo druh konstrukce);
- požární odolnost je sice vyhovující, ale **požární uzávěr je otevřený**. Samozavírací mechanismy se běžně osazují pouze na dveře do chráněných únikových cest, avšak v případě šachtových uzávěrů se předpokládá jejich uzavřená poloha a samozavírače se nevyžadují.

Pro elektroinstalační šachty v bytových domech vedených ve společných částech domu se často využívá kombinované konstrukční řešení (Obr. 2.11 (c)). V případě průběžného řešení šachty jsou požadavky na požární odolnost uzávěrů ústících do chráněných únikových cest vyšší, nejčastěji EI 15 DP1 – S, zatímco u kombinovaného řešení jsou požadavky nižší a často stačí

uzávěr EI 15 DP3 (dřevěné požární dveře bez těsnění proti průniku kouře). Někdy dokonce bývá navržen i uzávěr EW 15 DP3, je-li elektroinstalační prostor uvažován v daném podlaží jako požární úsek bez požárního rizika. **Kombinované řešení elektroinstalačních šachet navrhané z důvodu nižších požadavků na požární uzávěry je velice rizikové a nelze jej doporučit** zejména v bytových domech s ohledem na značnou hořlavost a vývoj toxických zplodin „neretardovaných“ kabelových izolací z měkčeného PVC. Dalším rizikovým faktorem je sama skutečnost, že požární uzávěry ústí z šachty přímo do společných částí domu (chodby, schodiště), které jsou často jedinou únikovou cestou z objektu.

2.4.6 Aktivní požární ochrana pro šachtové prostory

Aktivní požární ochrana v budově doplňuje ochranu pasivní o **systém požárněbezpečnostních zařízení**, který samočinně nebo řízeně reaguje a likviduje, případně snižuje účinek vznikajícího požáru v jeho počáteční iniciační fázi. Tato zařízení nejsou v instalačních šachtách běžná a jedná se spíše o speciální aplikace, kde šachty jsou jen součástí systému požární ochrany objektu jako celku, nebo se jedná o tzv. **autonomní systémy** střežící dílčí část prostoru nezávisle na ostatních aktivních prvcích.

Aktivními prvky pro požární zabezpečení šachtových prostor mohou být:

- elektrická požární signalizace (EPS);
- stabilní hasicí zařízení (SHZ);
- zařízení pro odvod kouře a tepla (ZOKT).

Elektrická požární signalizace (EPS) tvoří systém pro detekci a signalizaci požáru a předání varovné informace kompetentním osobám. Současně může aktivovat a ovládat požárněbezpečnostní zařízení napojená na řídicí ústřednu (např. SHZ, ZOKT, požární uzávěry apod.). EPS nezajišťuje vlastní likvidaci požáru, ale klíčovým způsobem se podílí na jejím zprostředkování. Pro detekci jsou samočinné a tlačítkové hlásiče v systému EPS propojeny přes kabelové smyčky na ovládací ústřednu. U chybně řešených šachet se vlivem komínového efektu může pásmo zakouření při požáru velice rychle šířit budovou. Kouř pronikající do navazujících prostor pak postupně aktivuje další a další hlásiče, které signalizují na ústředně požár, což pak snadno vede k značným komplikacím při represivním zásahu hasičů.

Stabilní hasicí zařízení (SHZ), nejčastěji sprinklerová, jsou jedním z nejefektivnějších nástrojů pro likvidaci požáru, které jsou navrhovány zejména do prostor s vysokým požárním rizikem a vysokou koncentrací osob. Tlak zejména pojišťoven a zahraničních investorů přináší tato zařízení i do koncepčně jednodušších staveb, avšak i v těchto případech se nejedná o bytové stavby, ale spíše o stavby občanské. Preventivní snahou a vizí do budoucna zejména Hasičského záchranného sboru ČR je integrace jednoduchých, avšak velice účinných hasicích zařízení označovaných jako **bytové sprinklery** – domestic sprinklers. Tato skrápěcí zařízení jsou se specifickým příslušenstvím (např. vyrovnávací nádrž, čerpadlo, řídicí jednotka) napojena na vnitřní vodovod, což systém činí výrazně levnější ve srovnání s klasickým systémem SHZ. Bytové sprinklery budou v budoucnu jistě eliminovat i rizika spojená s šířením požáru instalačními šachtami. Toto řešení, které se v ČR začíná označovat jako doplňkové hasicí zařízení, se již osvědčuje řadu let v zahraničí (např. v Anglii nebo USA). Standardní SHZ vytváří nejčastěji sprinklerové soustavy a ve vztahu k požadované zásobě požární vody jsou navrhována i jako **polostabilní hasicí zařízení (PHZ)** s nižší kapacitou zásoby vody v nádržích nebo se

zásobou vody závislou na připojení hasičské techniky, popř. jako **doplňková hasicí zařízení (DHZ)** využívající zdroj vody převážně z vnitřního vodovodu objektu.

Stále častěji jsou pro speciální provozy využívána zařízení využívající i jiné druhy hasiva. Jedná se o **hasicí zařízení mlhová (MHZ)**, **sprejová (RHZ; dříve označována jako drenčerová)**, **pěnová (FHZ)**, **plynová (GHZ)**, **prášková (WHZ)** a **aerosolová (AHZ)**.

Jak již bylo uvedeno, SHZ nacházejí svou využitelnost v šachtových prostorách v případě, kdy je jimi objekt jako celek koncepčně vybaven, což platí zejména pro sprinklerová zařízení. Z požárního hlediska jsou **vysoce rizikové shozy odpadků a prádla v budovách pro ubytování** (hotely, penziony), kde v patě šachet ve skladovací místnosti dochází k vysoké koncentraci požárního zatížení. Případný požár atakuje průběžnou šachtou mnoho pater a SHZ jsou zde klíčová. V rámci úspor jsou investory v některých případech nesmyslně zvažovány instalace v těchto prostorách, i když je navýšení nákladů ve srovnání se soustavou ve zbylé části objektu zcela zanedbatelné.

Velice efektivní pro prostory šachtového charakteru jsou zařízení využívající hasiva s vysokou schopností rozptylu a vysokou hasicí schopností. Mezi tato hasiva mohou být považována **vysokotlaká vodní mlha** (systém MHZ) a **hasicí aerosol** (systém AHZ).

Zařízení pro odvody kouře a tepla (ZOKT) jsou klíčová požárněbezpečnostní zařízení navrhovaná v rozsáhlejších prostorách budov se značným požárním zatížením a počtem osob (atria, garáž, shromažďovací prostory apod.). Tato zařízení jednak snižují intenzitu zakouření prostoru pro možnost evakuace osob a protipožárního zásahu a jednak snižují tepelné namáhání stavebních konstrukcí. ZOKT opět nejsou pro šachty jako takové běžně využívány, ale naopak ZOKT využívají šachet pro přirozený nebo nucený způsob odvodu kouře a tepla. Pro průběžné šachty výšky nad 45 m s možností vertikálního šíření zplodin hoření je požadováno požární odvětrání v nejvyšší části šachty s přívodem v části nejnížší (ČSN 73 0802, 2009).

2.4.6.1 Vysokotlaká vodní mlha

Vodní mlha je **výjimečná svým vysokým chladicím účinkem při minimální spotřebě vody**, což je dáno vysokým měrným povrchem mlhy ve srovnání s vodou ve formě kapek (Obr. 2.23). Tento způsob hašení byl původně vyvinut pro lodářský průmysl, ale velmi rychle a efektivně nachází své uplatnění i v běžných občanských budovách (hotely, administrativa) nebo speciálních aplikacích jako například kabelové kanály nebo kolektory.

Výhodou MHZ jsou výrazně nižší nároky na zásobu vody a jsou možné i aplikace, kdy je voda uskladněna v tlakových lahvích bez potřeby nádrže. Značně jsou sníženy škody způsobené promáčením, jelikož velké množství mlhy se v případě požáru vypaří. Vysoký tlak je docílen vysokotlakým čerpadlem, na které jsou napojeny rozvody a skrápěcí hlavice výrazně menších průřezů než u klasických sprinklerových soustav. Systém je náchylný na čistotu vody, zejména na usazování vodního kamene. Rozvodná potrubí jsou pak řešena jako nerezová a někdy je používána i destilovaná voda. Funkční princip soustavy je podobný jako u standardních sprinklerových SHZ, tj. buď zavodněné potrubí až k hasicím hlavicím s aktivací skleněnou ampulí s rozpínavou tekutinou za zvyšujících se teplot, nebo nezavodněné potrubí s trvale otevřenými hlavicemi (dýzami), kde spuštění vody do systému zajišťuje systém EPS.

Využití systému MHZ v ČR se je v současné době stále častější a například v Národní technické knihovně v Praze je instalováno zařízení pro velkoobjemové hašení vodní mlhou, které je v současné době svým rozsahem světově unikátní. Zajímavý výzkum zaměřující se na

objemové hašení kabelových tunelů vodní mlhou probíhá na vědeckém pracovišti VTT ve Finsku (Varri, Jaatinen, & L., 2008), což tato zařízení s výhodou předurčuje pro speciální aplikace i do šachtových prostor.



Obr. 2.23 Skrápěcí hlavice pro systém hašení vysokotlakou vodní mlhou

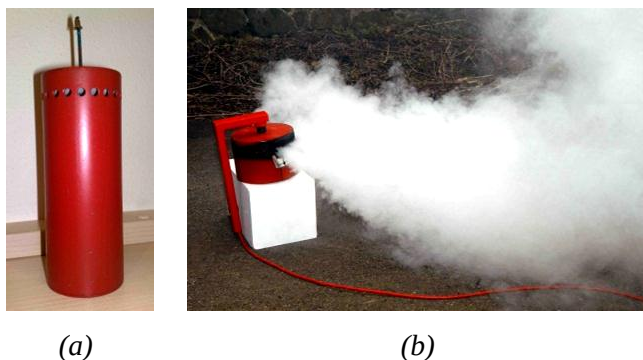
2.4.6.2 Hasicí aerosol

Aerosolová stabilní hasicí zařízení (AHZ) jsou ve srovnání s ostatními systémy jednodušší zařízení využívající principu inhibičního účinku rozptýleného hasicího aerosolu ve vzduchu. Zařízení mohou být řešena jako *spolupracující s EPS nebo jako autonomní* (nezávislá). Navrhována jsou *pro objemový způsob hašení do uzavřených prostor* (servrovny, elektroinstalační šachty a kanály, sklady apod.) a skládají se z následujících komponentů:

- **generátory hasicího aerosolu** (Obr. 2.24) – malé plechové beztlakové nádoby plněné zdrojovou směsí, kterou uvádí v činnost tzv. startér hoření chemickou reakcí;
- **zdrojová směs** – pevně slisovaná a velice trvanlivá směs uložená v generátorech tvořená anorganickými solemi impregnovanými proti vlivu prostředí organickými pryskyřicemi;
- **hasicí aerosol** – heterogenní směs vysoce jemného hasicího prášku a inertních plynů vynášená z generátoru po aktivaci chemické reakce zdrojové směsi v generátoru; aerosol se vznáší v prostoru po desítky minut a zabraňuje hoření inhibičním účinkem (nikoliv chladícím, jako je tomu např. u vody); maximální efektivita a použitelnost je zejména v prvotních fázích požáru při rozhořívání;
- **startéry hoření** – jednoduchá elektronická zařízení umístěná v generátorech, která aktivují elektrickou energii chemickou reakcí; eventuálně u autonomních systémů jsou startéry aktivovány tepelnou expozicí a indukcí elektrického proudu vzniklého výbuchem malého množství stříelného prachu;
- **detekční zařízení** – samostatný systém detekce požáru nebo propojení s detektory (hlásiči) v systému EPS;
- **související technická zařízení** – řídicí a informační systémová jednotka (automat), rozvaděč, náhradní zdroj elektrické energie apod.

Výhodou popsaného AHZ je trvanlivost zdrojové směsi v generátorech, která není časově omezena, minimální nároky na údržbu zařízení a nižší pořizovací náklady. Použitelné jsou do uzavřených prostor s výškou max. 12 m a objemem 20 000 m³ s rizikem požáru pevných látek i kapalin, kde v případě dostatečné koncentrace aerosolu požár hasí objemovým účinkem. V případě šachet je vhodné použití například u vertikálních kabelových tras s častou výměnou nebo doplňováním instalací, kde není racionální provádět kabelové ucpávky (například výpočetní centra). Byly konzultovány i možnosti využití autonomních systémů pro běžné šachty v bytových a občanských stavbách, avšak jejich využitelnost zde zatím není. Problém spočívá

v nízké spolehlivosti aktivace zdrojové směsi v generátorech. Autonomní zařízení jsou používána lokálně jako sanace například pro elektrorozvaděče, které nesplňují požárnětechnické požadavky, a je nutné eliminovat riziko hoření kabelových instalací v návaznosti na chráněné únikové cesty. Hasící aerosol je zdravotně nezávadný a nepředstavuje toxické nebezpečí. Jedná se však o ve vzduchu rozptýlený jemný prášek, který po vdechnutí může po určitou dobu ulpívat na sliznicích dýchacích cest. Problém může nastávat se sníženou viditelností a není použitelný v prostorách, kde se shromažďuje více než 50 osob (Fire-Jack®, 2011).



Obr. 2.24 (a) nejmenší autonomní generátor hasícího aerosolu s termocitlivou zápalnou šňůrou napojenou na kapsle střelného prachu startující chemickou reakci zdrojové směsi;
(b) generátor vyvíjející hasící aerosol

2.5 Modelování požáru v uzavřeném prostoru

Současná doba je celosvětově charakteristická realizací velmi odvážných a komplexních projektů staveb, které s sebou přináší mimo jiné i specifické úlohy řešící jejich požární zabezpečení. Rozlehlá obchodní centra, výškové administrativní budovy, velkokapacitní sportovní stavby, shromažďovací prostory nebo dopravní tunelové stavby mohou být příkladem této komplexnosti vyžadující specifický požárněinženýrský přístup.

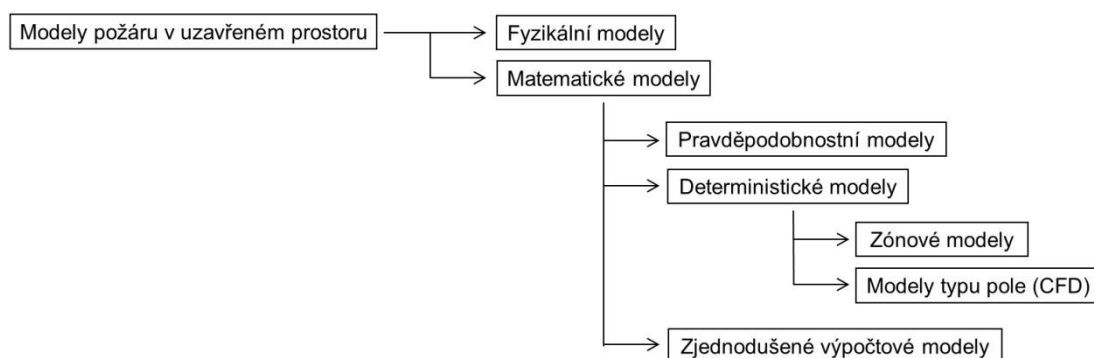
Těmto skutečnostem v posledních letech odpovídá dramatický nárůst různých počítačových programů, které simulují účinky požáru v uzavřeném prostoru, a to zejména pohyb kouře a tepla. ***Matematické modely požáru se tak stávají progresivním simulačním nástrojem jednak pro návrh a ověření požární bezpečnosti staveb a jednak pro rekonstrukce požárních událostí při vyšetřování.***

Současná právní legislativa v České republice o využití těchto požárněinženýrských principů přímo nepojednává. V této souvislosti lze částečně interpretovat zákon o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů (Zákon č. 133 Sb., 1985), který v § 99 umožňuje autorizované osobě použít postup odlišný od konzervativního postupu, který stanoví česká technická norma nebo jiný legislativní dokument. Použitím matematického modelování, tj. odlišného postupu, musí být však dosaženo stejného výsledku jako konzervativním normovým postupem. Tato skutečnost však neznamená, že by se hodnoty veličin vypočtené matematickým modelem musely rovnat normovým hodnotám. Pro akceptovatelné výsledky je však nutné dosáhnout takových hodnot, při kterých bude zachována požadovaná požární bezpečnost stavby (Kučera & Pezdová, Základy matematického modelování požáru, 2010).

Principy požárního modelování jsou v současné době postupně zaváděny do kodexu českých technických norem požární bezpečnosti staveb (např. ČSN 73 0802, 2009) a jsou již delší dobu

k dispozici v Eurokódu 1 (ČSN EN 1991-1-2, 2006). Významnou podporu a požárněinženýrskou osvětu v posledních letech zajišťují mnozí autoři publikující v rámci Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství (SPBI). Dostupné se tak v českém jazyce stávají důležité informace ze zahraničního i tuzemského výzkumu. Hasičský záchranný sbor České republiky rovněž vytváří systematickou podporu pro zavádění těchto principů do projekční praxe.

S vývojem a praktickým využitím softwaru souvisí i dva důležité pojmy, které jsou často zaměňovány – **verifikace a validace programů**. Verifikací programu se rozumí především ověření popisu modelu, kontrola správnosti jeho algoritmů, matematické přesnosti výpočtů, uživatelského prostředí apod. Validací programu se rozumí zhodnocení míry shody mezi počítačovou predikcí a experimentálně získanými údaji v reálném prostředí. Validačním procesem se sice nezíská zcela validní model, ale tvůrce či uživatel programu může obdržet velmi důležité informace o limitním využití ověřovaného modelu. ***Společně s matematickými modely jsou realizovány fyzikální modely požáru***, které jakožto zjednodušené uměle vytvořené objekty v reálném nebo častěji zmenšeném měřítku slouží právě například k validačním procesům, k pozorování zajímavých fyzikálních jevů nebo získání zcela nových poznatků. Fyzikální modely napodobují reálné chování požáru, avšak zcela postihnout je ve své podstatě nikdy nemohou.



Obr. 2.25 Schematické rozdělení modelů požáru v uzavřeném prostoru

Na druhou stranu je nutné upozornit, že ***uživatelská náročnost většiny počítačových programů je značná***. Na trhu je v současné době velké množství komerčního i veřejně dostupného softwaru, avšak každý z nich má svou specifickou oblast využití, a velice důležitý se tak stává správný výběr. Přesnost a použitelnost simulovaných výsledků tak do velké míry závisí nejen na možnostech daného programu, ale též na fundamentálních znalostech uživatele v oblasti dynamiky požáru, fyzikálních a chemických procesů a v neposlední řadě na relevantnosti vstupních parametrů pro danou simulaci (například materiálové charakteristiky), jejichž dostupnost bývá často velký problém.

Výsledky počítačových simulací v podobě snadno získaných grafů, barevných kontur, vektorových polí či dokonce videozáznamů mohou působit velice sofistikovaným dojmem, ale zároveň je nezbytné mít stále na zřeteli, že tyto výsledky mohou být zatíženy výraznou chybou pohybující se i vysoko nad hranicí 100 % ve srovnání s potencionální realitou.

2.5.1 Rozdělení matematických modelů požáru

Matematický model je obecným pojmem využívaným v rozličných vědních oborech. Jedná se o abstraktní objekt (model) popisující s využitím matematického jazyka nejčastěji reálný systém

(jev) – například požár v uzavřeném prostoru. **Matematické modelování** je pak pojmem používaným pro proces vývoje matematického modelu. V oblasti požární bezpečnosti staveb jsou používány nejčastěji dva typy matematických modelů (Obr. 2.25), a to modely pravděpodobnostní a deterministické (Karlsson & Quintiere, 2000).

Pravděpodobnostní modely přímo nepopisují konkrétní fyzikální ani chemické děje, ale rozvoj požáru definují řadou „náhodných pokusů“, pro které je charakteristická nedostatečná znalost počátečních podmínek. Rozhodování je založené na dostupných statistických datech nebo inženýrském úsudku. Při opakování náhodných pokusů a při zachování okrajových podmínek se pak mnohdy získávají rozdílné výsledky. Používány jsou tři typy pravděpodobnostních modelů, a to modely síťové, statistické a simulační.

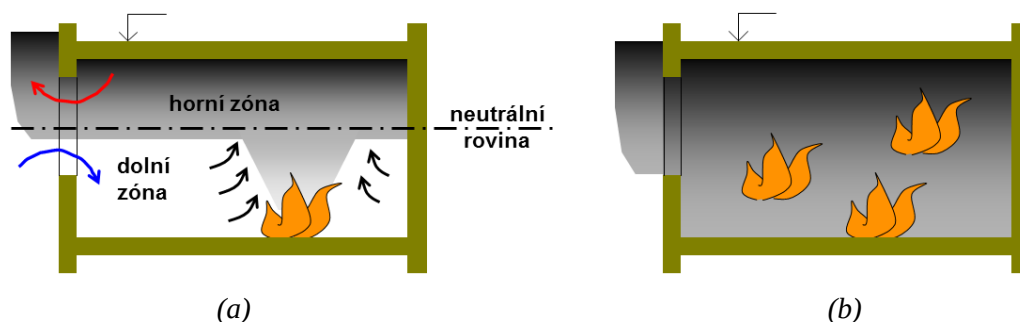
Deterministické modely používané v požárněinženýrském návrhu budov mohou být obecně rozděleny do několika kategorií s ohledem na řešené téma. Mezi hlavní řešená témata patří především transport kouře a tepla při rozvoji požáru v uzavřených prostorech, aktivace požárních detektorů a sprinklerů, evakuace osob v budovách nebo teplotní analýza konstrukčních prvků. Deterministické modely pro simulace rozvoje požáru jsou dále předmětem této práce. Rozvoj požáru je řešen nadefinovanými matematickými rovnicemi, které popisují vykonané fyzikální a chemické děje. Na rozdíl od pravděpodobnostních modelů se zachováním okrajových podmínek výpočtu dospěje vždy ke stejnému výsledku. Deterministické modely rovněž nesledují míru pravděpodobnosti, s jakou k požáru může dojít, ale řeší již konkrétní podmínky pro rozvoj požáru, tzv. **požární scénář**. Rozsah použitelnosti modelů může být široký, od velmi jednoduchých majících závislost pouze na několika fyzikálních veličinách až po modely značně složité popisující požár v jedné nebo i několika místnostech (Kučera & Pezdová, Základy matematického modelování požáru, 2010). Deterministické matematické modely predikující rozvoj požáru v uzavřeném prostoru se dělí na dvě základní následující podskupiny, a to **zónové modely a modely typu pole, též označované jako CFD modely**.

Matematické modely v jejich výčtu lze doplnit o **zjednodušené výpočtové postupy** pro „rychlé ruční“ výpočty. Ty jsou společně se zónovými modely a modely typu pole podrobněji popsány v následujících kapitolách.

2.5.2 Zónové modely

Zónové modely jsou dnes v požárněinženýrské praxi zavedeným a osvědčeným nástrojem pro zjednodušenou simulaci šíření zplodin hoření a rozvoj požáru v uzavřeném prostoru. Používány jsou **jedno- nebo dvouzónové modely** (Obr. 2.26) rozdělující daný prostor (místnost) do jednoho nebo dvou samostatných homogenních „kontrolních objemů“ (zón), které mají stejnoměrnou teplotu, hustotu a koncentraci plynů. V počáteční fázi rozvíjejícího se požáru s plamenným hořením (tj. před flashover efektem) model předpokládá vznik dvou zón v místnosti, tj. dvouzónový model. Dolní „studená“ zóna se ochlazuje přívodem vzduchu z exteriéru přes otvory a horní „horká“ zóna (kouřová vrstva) se postupně nahřívá vzestupným proudem zplodin od požáru prostřednictvím požárního kužele (fire plume). Jednozónový model vyjadřuje stav hořícího prostoru jako jednu homogenní zónu po dosažení flashover efektu, tj. po dosažení předem definovaných přechodových kritérií, která tomuto stavu odpovídají. **Přechodová kritéria** se mohou pro jednotlivé modely částečně lišit, ale v zásadě sledují teplotu a tloušťku horní zóny. Například Eurokód 1 (ČSN EN 1991-1-2, 2006) doporučuje jako přechodové kritérium teplotu horní vrstvy 500 °C nebo stav, kdy horní zóna zaplní více jak 80 % výšky místnosti. Jiné zdroje

uvádí vyšší přechodovou teplotu v rozmezí 500–600 °C nebo hustotu tepelného toku na úroveň podlahy 20 kW/m² (Karlsson & Quintiere, 2000).



Obr. 2.26 Schéma pro deterministický model: (a) dvouzónový; (b) jednozónový

Kromě zmíněných přechodových kritérií je velmi užitečná **možnost sledování kritických podmínek pro možnost přežití evakuovaných osob** nacházejících se v hořícím prostoru. Například zónový model Argos (Deibjerg, Husted, Bygbjerg, & Westerman, 2003) zařazuje mezi tyto podmínky kritéria jako viditelnost (min. 3–10 m), výška nezakouřené vrstvy (min. 1,6 m + 10 % z výšky místnosti) a její teplota (max. 60–80 °C), hustota tepelného toku z kouřové vrstvy (max. 2,5 kW/m²), koncentrace kyslíku (15 %), CO₂ (max. 5 %) a CO (max. 2 000 ppm). Tento model mimo jiné umožňuje definovat i specifický tzv. **doutnající požár**. Tento typ požáru je charakteristický nízkou rychlostí uvolňování tepla, která je zřídka schopná vytvořit kouřovou vrstvu, a tudíž dvouzónový princip není v tomto případě relevantní. Doutnající požár například od nedopalku cigarety na pohovce může způsobit vlivem nedokonalého spalování bez přítomnosti plamenů vysoké koncentrace toxických plynů, jako je oxid uhelnatý.

Dvouzónové modely pracují s diferenciálními rovnicemi pro zachování energie (transportu tepla), hmoty (hmotnostní výměny plynů) a výměny chemických látek mezi zónami. Vzhledem ke skutečnosti, že za vyšších teplot se chování plynů v hořícím prostoru blíží chování tzv. ideálních plynů, je také využívána **stavová rovnice ideálního plynu**. Dvouzónové modely, na rozdíl od modelů typu pole, zcela zanedbávají rovnice zachování hybnosti, a jsou tak **nezpůsobilé odhadnout rychlosti proudících plynů**.

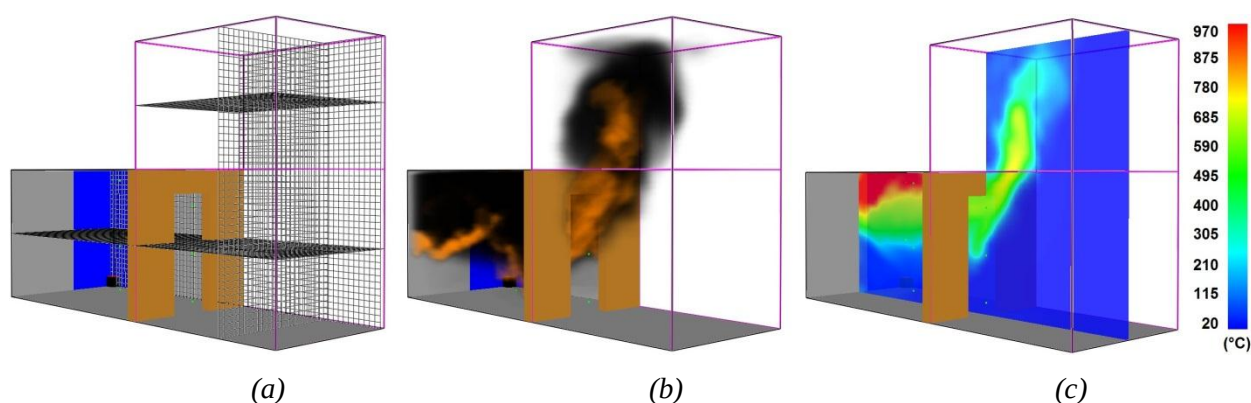
Předností zónových modelů je především jejich uživatelská nenáročnost a matematická jednoduchost, neboť výpočet probíhá mezi dvěma kontrolními objemy, což snižuje výrazně nároky na hardwarové vybavení ve srovnání s modely typu pole. Na druhou stranu zónové modely využívají ve svých rovnicích řadu empirických vztahů, udávají průměrné hodnoty a nelze je využít v podmínkách složitější geometrie. Zcela **nevhodné je jejich využití v dispozicích s jedním dominantním rozměrem (šachty, chodby, tunely)**. V případě požáru v šachtě je sloupec horkých plynů (fire plume) výrazně ovlivňován blízkými stěnami a vzduch není do fire plume unášen tak, jak je běžně uvažováno v zónových modelech. Pro krátké šachty s průřezovým poměrem $\alpha < 2$ (poměr výšky a šířky šachty) je pravděpodobnost kontaktu stoupajícího proudu nízká a využitelnost některých dvouzónových modelů je uváděna jako možná (Klote & Forney, 1993). Pro všechny běžné „vyšší“ šachty je vhodné použít podrobnější modely typu pole, případně šachtu velmi zjednodušeně simulovat jednozónovým modelem. V případě chodeb nebo tunelů problém spočívá také ve specifickém chování podstropního proudu kouře, který postupně chladne, klesá a mísí se s dolní nezakouřenou zónou.

2.5.3 Modely typu pole (CFD)

Matematické modely typu pole jsou progresivním výkonným nástrojem vyvíjeným pro požárněinženýrské simulace postavené na algoritmech výpočtového proudění tekutin častěji označovaných zkratkou CFD (Computational Fluid Dynamics). Samotné CFD algoritmy jsou matematické principy používané v mnoha vědních oborech sledujících tekutiny v pohybu a svůj základ mají v numerických metodách Isaaca Newtona z období kolem roku 1700. Bez využití výpočetní techniky však nebyly tyto metody širěji využitelné, a jejich rozvoj patří tedy druhé polovině 20. století.

Podobně jako v zónových modelech i v technologii CFD je oblast zájmu – tzv. **výpočtová oblast rozdělována do velkého, avšak konečného počtu trojrozměrných kontrolních objemů (buněk) vytvářejících prostorovou síť**. Pro každou buňku jsou pak rovněž řešeny stavové rovnice a rovnice zachování energie, hmoty, chemických látek, ale navíc jsou řešeny rovnice zachování hybnosti. Jedná se o třídimenzionální časově závislé parciální diferenciální rovnice obecně označované též jako Navier-Stokesovy (N-S). Striktně řečeno, pouze právě rovnice zachování hybnosti jsou N-S rovnicemi, avšak termín „N-S“ je často používán v širším smyslu pro všechny rovnice řešené v rámci CFD (Klote & Milke, 2002). Výpočetní oblast je samozřejmě možné řešit i jako jedno- nebo dvoudimenzionální (rovinná výpočetní síť), což výpočty značně urychluje. Samotná metodika CFD neřeší požární specifika a ta jsou pak definována jako nadstavba – tzv. **požární submodely** (např. submodel turbulencí, pyrolýzy, hoření, radiace). Pro matematický požární model typu pole se zejména v zahraniční literatuře rovněž vžil pojem CFD model a takto je v dalším textu také označován.

CFD modely jsou vhodné pro celou řadu situací, ve kterých zónové požární modely nemohou obstát, a své uplatnění si díky rychlému rozvoji výpočetní techniky stále častěji nachází v praxi, tj. mimo tradiční oblast výzkumu. Od účinků rozvíjejícího se požáru až již v uzavřeném prostoru, nebo ve vnějším prostředí lze simulovat celou řadu jevů, jako například teplotní, rychlostní či tlaková pole, pohyb kouře a plamene, skrápěcí systémy, požární odvětrání apod. (Obr. 2.27). Využívány tak jsou například pro posouzení specifických problémů u staveb, u kterých se konzervativní (normový) postup stává neefektivním.



Obr. 2.27 Příklad CFD simulace požáru v rohu uzavřené místnosti s dveřmi:
(a) 3D výpočetní síť; (b) pohyb kouře a plamene; (c) rozložení teplotního pole

Naopak nevýhodou CFD programů je často vysoká uživatelská náročnost a obtížná dostupnost vstupních dat, zejména materiálových charakteristik, které mohou výstupní data zatížit výraznou chybou. Vysoké požadavky na hardware jsou i v dnešní době dalším limitujícím

faktorem. Výpočetní oblast může pokrývat síť obsahující statisíce, ale i miliony výpočetních buněk a *výpočty se snadno mohou stát ve své limitě neproveditelné, tzv. numericky nestabilní*. O náročnosti výpočtu tedy kromě vlastního simulovaného jevu výrazně rozhoduje jemnost (hrubost) výpočetní sítě a lze se běžně setkat s výpočty trvajících několik dní či týdnů. Lze tedy konstatovat, že *jemnější síť znamená přesnější, ale také časově náročnější numerické výpočty*.

Tradiční, tedy původní CFD modely nebyly určeny k modelování tak komplikované heterogenní chemické reakce, jako je hoření. Podrobné submodely pro rozvoj hoření jsou vyvíjeny a integrovány do CFD modelů výjimečně (např. software FDS) a v ostatních aplikacích je rychlost uvolňování tepla a rychlost pyrolýzy definována jako vstupní parametr (Kučera & Pezdová, Základy matematického modelování požáru, 2010). I další požární submodely (např. turbulence, radiace) vyžadují určitou míru aproximace a empirických vztahů.

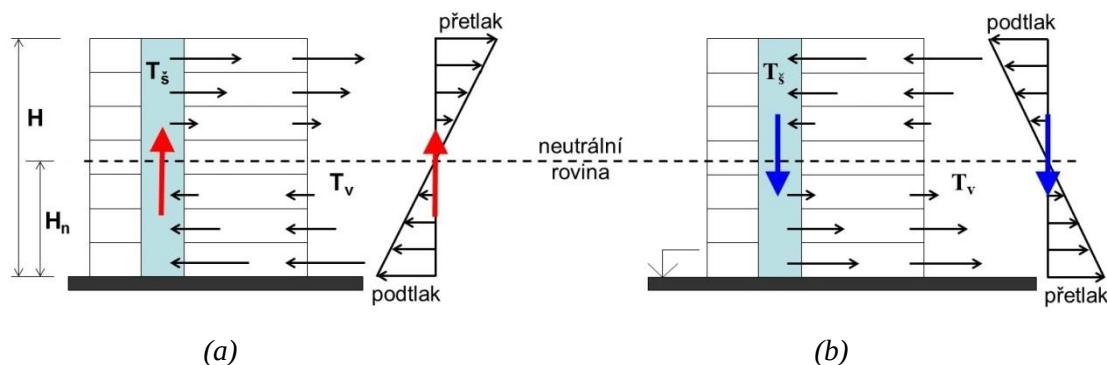
2.5.4 Zjednodušené výpočtové modely a komínový efekt

Zjednodušené výpočtové modely obecně slouží pro „ruční“ výpočty nejčastěji s využitím tabulkových procesorů nebo jednoduchých programů. Téměř v každé literatuře s požárnětechnickou tematikou lze najít mnoho různorodých empirických vztahů týkajících se například hmotnostního toku produktů pyrolýzy v požárním kuželu (fire plume), výšky plamenů, transportu tepla a kouře, tlakových poměrů apod. Nominální a parametrické křivky (viz kapitola 2.2.1) jsou dalším zjednodušeným modelem pro stanovení teploty rozvíjejícího se požáru.

Kouř je schopen migrovat do míst značně vzdálených od ohniska požáru, a může tak výrazně ohrozit životy osob, které o vzniku požáru nemusí mít v danou chvíli ani tušení, následně může blokovat jejich evakuaci, ztěžovat protipožární zásah hasičům a v neposlední řadě způsobovat značné hmotné škody na zakoupeném majetku. *Mezi hnací síly pohybu kouře v budovách patří především:*

- přirozeně vznikající komínový efekt;
- vztlak a expanze hořících plynů;
- tlak a sání větru (s uvážením vlivu infiltrace fasády objektu);
- nucený způsob ventilace v budově (vzduchotechnika, klimatizace);
- efekt pohybujících se výtahů apod.

Komínový efekt v prostorách šachtového charakteru je hlavní hnací silou pohybu kouře v budovách a z pohledu zjednodušených výpočetních postupů je rovněž častým předmětem zájmu. Vlivem tlakových poměrů má za následek proudění směřující směrem do nebo ven z šachty. V šachtách propojených s vnějším prostředím (např. otvory) má vzduch běžně stoupající charakter, je-li venku chladno. Vztlakové síly působí na vzduchu v budově (šachtě) díky jeho vyšší teplotě a menší objemové hmotnosti oproti vzduchu vnějšmu. Nicméně komínový efekt může mít i klesající charakter proudění v šachtách, a to zejména v klimatizovaných budovách a horkých dnech (Obr. 2.28). Stoupající proudění v šachtách je možné označit jako normální komínový efekt a klesající proudění jako obrácený (reverzní) komínový efekt. Pohybující se výtahová kabina v šachtě rovněž způsobuje přechodné změny tlaků. Například výtahová kabina pohybující se směrem dolů vytlačuje pod sebou vzduch ze šachty a naopak nad sebou vzduch nasává, čímž rovněž vznikají reverzní tlakové poměry v šachtě. Při vzestupném pohybu výtahové kabiny je situace opačná (Klote & Milke, 2002).



Obr. 2.28 Komínový efekt v budově: (a) normální; (b) obrácený (reverzní)

Intenzitu komínového efektu v šachtě dále ovlivňuje výška budovy, teplotní rozdíl mezi vnitřním a vnějším prostředím, aerodynamický tvar (průřez, vřazené odpory v šachtě) a třecí síly vzdušného proudu o povrch stěn. U šachet větších průřezových ploch tak lze u normálního komínového efektu při zanedbání třecích sil empiricky spočítat rozdíl tlaků mezi prostorem šachty a vnějším vzduchem podle následujícího vzorce:

$$\Delta p = \frac{g \cdot p_{atm}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_s} \right) \cdot z \cong 3\,460 \cdot \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_s} \right) \cdot z \quad (2.6)$$

kde: Δp – rozdíl tlaků (Pa)

T_v – absolutní teplota vnějšího (venkovního) vzduchu (K)

T_s – absolutní teplota vzduchu v šachtě (K)

$p_{atm} \cong 101\,300$ Pa – absolutní atmosférický tlak

$R \cong 287$ J/kg/K – plynová konstanta vzduchu

z – vzdálenost od neutrální roviny, tj. pořadnice v lineárním průběhu tlaku (m)

Předchozí rovnice byla vyvinuta pro šachty spojené s vnějším prostředím a pro konstantní vnější i vnitřní teplotou. Za neutrální rovinu je považována horizontální rovina umístěná v $z = 0$, kde tlak uvnitř budovy se rovná tlaku vnějšmu. Pokud je známa poloha neutrální roviny, lze tuto rovnici využít ke stanovení rozdílu tlaku a následně například k výpočtu rychlosti proudění (viz kapitola 3.3.3). Obdobně pro normální komínový efekt v šachtě s jedním otvorem po celé její výšce lze polohu neutrální roviny určit z empirického vztahu pro poměrnou výšku:

$$\frac{H_n}{H} = \frac{1}{1 + (T_s / T_v)^{1/3}} \quad (2.7)$$

kde: H_n – výška od dna šachty k neutrální rovině

H – celková výška šachty

Pokud je do předchozí rovnice dosazena stejná vnitřní i vnější teplota, pak výška k neutrální rovině H_n vychází do poloviny výšky šachty. **Dochází-li účinkem požáru ke zvyšujícím se teplotám uvnitř šachty, poloha neutrální roviny postupně klesá.** Toto empirické tvrzení se stalo předmětem výzkumu čínských autorů (Zhang, Lu, Huo, & Feng, 2008), kteří vyvíjí **specifický dvouzónový model rozdělující šachtu po výšce na zónu požární a zbývající prostor.** Na rozdíl od dvouzónového modelu v uzavřeném prostoru (místnosti) s horní horkou vrstvou kouře pod stropem, je v případě dvouzónového šachtového modelu uvažována konstantní vysoká teplota jen v zóně požárního zdroje na dně šachty a v části horní je teplota nižší. Tento zónový model je autory porovnán s CFD modelem a prokázán uspokojivý soulad pro různé okrajové podmínky

(např. velikost otvorů do šachty nebo tepelný výkon požáru). Závěrem je **konstatováno, že výška neutrální roviny s rostoucí teplotou neklesá, ale naopak** že poměrná výška H_n/H závisí především na podmínkách ventilace, tj. velikosti otvorů do šachty, a mění se v rozmezí cca 0,5–0,62. Nicméně ve vědecké práci zmíněných autorů nejsou uvedeny některé důležité koeficienty v uvedených matematických vztazích a model nelze zatím využít.

Zjednodušené výpočetní postupy využívající empirické vztahy jsou v oblasti požárního inženýrství samy o sobě většinou aplikovatelné omezeně. Častější uplatnění nachází jako součást podrobnějších zónových nebo CFD modelů a konzervativních normových postupů. Užitečné mohou být rovněž jako studijní pomůcka nebo kontrolní mechanismus počítačových simulací.

2.5.5 Fire Dynamics Simulator (FDS)

FDS je CFD model pro simulace pohybu tekutin vyvolaného jakýmkoliv tepelným účinkem, tj. nejen požárem. Model numericky řeší Navier-Stokesovy rovnice vhodné pro tepelně indukovaná proudění s malou rychlostí (Machovo číslo $\leq 0,3$), a to zejména s ohledem na **transport tepla a kouře od požáru**.

FDS je celosvětově stále častěji využívanou špičkovou aplikací ať již v oblasti požárního výzkumu, požárněinženýrské praxe nebo rekonstrukcí závažných požárů. Jedná se o nekomerční **volně dostupný software** podporovaný americkou vládou, který je pod dlouholetým vývojem odborného týmu specialistů organizace NIST (National Institute of Standards and Technology) ve spolupráci s technickým výzkumným institutem VTT ve Finsku a dalšími partnery. První verze FDS 1 byla po téměř dvaceti letech vývoje a testování uvolněna pro veřejnost v roce 2000, následovaly postupně další verze až po současnou pátou verzi FDS 5 s otevřeným zdrojovým kódem. Zároveň se v současné době pracuje a testuje šestá verze FDS 6, která je využita i dále v experimentální části této disertační práce (viz Kapitola 3). Pro podrobnější seznámení s programem FDS je vhodné studium uživatelského a technického manuálu.

FDS je používán k modelování následujících fenoménů:

- transport tepla a produktů hoření od požáru při „pomalých rychlostech“;
- transport tepla konvekcí a radiací mezi plynem a pevnými povrchy;
- pyrolýza (proces hoření);
- šíření plamene a rozvoj požáru;
- aktivace sprinklerových hlavice a tepelných a kouřových detektorů (hlásičů);
- sprinklerové skrápění a hašení vodou (vodní mlhou).

Vstupní parametry

Veškeré vstupní parametry pro simulaci požárního scénáře jsou programem FDS načítány ze samostatného textového souboru vytvořeného uživatelem v běžném textovém editoru (např. Poznámkový blok v operačním systému MS Windows) ve formátu *.fds. Vytvářet vstupní soubor (příklad viz Příloha 3) lze přímo ve specifickém programovacím jazyku nebo lze využít komerční preprocesor (software PyroSim) jakožto pomocné grafického rozhraní. Vstupní soubor obsahuje informace o výpočetní síti, okolním prostředí, geometrii prostoru, materiálových vlastnostech, kinetice hoření a požadovaných výstupech. Geometrie veškerých modelovaných překážek (stěny, stropy, nábytek apod.) v nadefinované výpočetní oblasti se musí přizpůsobit

pravoúhlé numerické síti, či skupině sítí a velikosti jejích buněk. Prvky menší než jedna buňka v síti jsou pak uvažovány buď v její velikosti, nebo jsou ze simulace vyřazeny. Pro každou modelovanou překážku je definován její ohraničující povrch (např. tloušťka, barva, okrajové podmínky odvráceného povrchu) s odkazem na specifické materiálové vlastnosti povrchu (např. tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, objemová hmotnost, emisivita, a parametry vyjadřující jejich hořlavost). Pevné povrchy překážek mohou být zadány jako vícevrstvé (až 20 vrstev) z různých materiálů a každá vrstva může dále obsahovat různé materiálové komponenty.

Výstupní data

FDS počítá teploty, hustotu, tlak, rychlost a chemické složení uvnitř každé výpočetní buňky v každém časovém kroku. Běžně jsou definovány statisíce až miliony výpočetních buněk a tisíce až statisíce časových kroků. Navíc, FDS počítá na každém pevném povrchu teplotu, tepelný tok, úbytek hmotnosti a mnoho dalších parametrů. Uživatel musí tedy pečlivě zvážit, jaká data se mají ukládat, stejně tak jako je tomu u reálných experimentů. Výstupní soubory mohou být i s malým počtem sledovaných parametrů značně obsáhlé (běžně i několik GB). Typicky jsou v FDS pro plynnou fázi sledována výstupní data jako teplota, rychlost proudění a hustota plynů, tlakové poměry, koncentrace zplodin (vodní pára, CO₂, CO), hustota kouře, odhad viditelnosti apod. Na pevném povrchu program FDS predikuje další hodnoty spojené s energetickou bilancí mezi plynnou a pevnou fází jako například povrchová teplota, tepelný tok (radiace, konvekce), rychlost hoření. Standardně jsou sledována výstupní data jako celková rychlost uvolněného tepla (HRR) nebo hmotnostní a energetický tok skrz otvory a pevné povrchy.

Interpretace zaznamenaných dat

Nejpoužívanějším způsobem je „**bodový**“ **záznam** sledované veličiny (teplota, tepelný tok, rychlost proudění apod.), která pak může být v grafu vykreslena jako funkce času (například záznam termočlánku pro sledování teploty). FDS ukládá naměřené hodnoty v definovaných bodech do samostatného výstupního souboru ve formátu *.csv, tj. do jednoduchého souborového formátu odděleného čárkami pro výměnu tabulkových dat. Data je pak nutné v tabulkovém procesoru (nejčastěji Excelu) přerozdělit do sloupců a desetinnou tečku používanou častěji v zahraničí nahradit desetinnou čárkou používanou v ČR. FDS dále umožňuje **záznam statických obrázků** proudícího pole ve specifickém formátu Plot3D, který je automaticky generován pro celou výpočetní oblast. Náznornější způsob vizualizace dynamiky proudu v čase představují **barevné izoplochy – kontury** (Obr. 2.27 (c)), které mohou být sledovány jak v rovině, tak na povrchu pevných překážek (např. dopadající tepelný tok). Prostorový pohyb částic (kouř, plamen, vodní kapky) generovaných z pevných či ventilačních povrchů a dynamiku barevných kontur umožňuje zobrazit specifický **post-procesorový software Smokeview (SMV)** formou videozáznamu. SMV je instalován jako běžná součást programu FDS.

Požární submodely

Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, požární specifika v CFD modelech jsou definována v tzv. požárních submodelech. V případě programu FDS se jedná například o submodely pro hydrodynamiku proudění (turbulence), radiaci, pyrolýzu nebo hoření.

Hydrodynamický submodel v programu FDS charakterizuje turbulentní proudění tekutiny pomocí vírových struktur s různou velikostí a umožňuje simulaci ve dvou základních módech, a to jako **přímá numerické simulace DNS** (Direct Numerical Simulation) **nebo simulace velkých vírů LES** (Large Eddy Simulation). Metoda DNS je numericky a časově extrémně náročná, využitelná tak jen velmi omezeně, a to pro simulace v jemné výpočetní síti o velikosti buněk

pouze okolo 1 mm. DNS zohledňuje nejjemnější vírové struktury, které mají u běžného požáru délku právě okolo 1 mm, a navíc velice rychlou frekvenci fluktuace plamenů až okolo 10 kHz. Program FDS využívá defaultně nastavenou metodiku LES zanedbávající ve výpočtech jemné vírové struktury a naopak zohledňující pouze takové víry, které svou velikostí mají největší význam z hlediska přesnosti řešených rovnic.

V FDS jsou často zaměňovány pojmy **hoření plynné fáze a pyrolýza pevné fáze**. V případě hoření se jedná o reakci plynů z paliva s kyslíkem, v případě pyrolýzy jde o tepelný rozklad za vysokých teplot a generování plynů z povrchu pevného nebo kapalného paliva. Zatímco v FDS může být definováno mnoho typů hořlavých materiálů, plynné palivo může být definováno pouze jedno. Důvodem jsou extrémně numericky náročné transportní rovnice v případě více druhů plynných paliv. Hlavní **submodel hoření** v FDS (tzv. mixture fraction model) umožňuje simulovat účinek požáru a jeho rozvoje dvěma rozdílnými způsoby. První jednodušší způsob spočívá v **zadání předem známé rychlosti uvolněního tepla** (HRRPUA; kW/m²) na určitou plochu pevného nebo ventilačního povrchu. Tento způsob v podstatě vytvoří plynový hořák, jehož výkon v čase lze uvažovat jak konstantní, tak proměnlivý. Reálně hořící povrchy pevných předmětů (např. požár křesla) v podstatě vždy vykazují časově proměnlivou hodnotu uvolněního tepla závisící na okrajových podmínkách, zejména pak na poloze hořícího předmětu vůči ostatním překážkám a přístupu vzduchu. Experimentálně zkoušeny jsou at' již ve volném nebo uzavřeném prostoru nejrůznější hořící předměty (např. nábytek, instalace, obklady, auta) a výsledky jejich uvolněního tepla tak lze částečně uplatnit v požárních simulacích (Särdqvist, 1993). Časovou proměnlivostí tepelného výkonu hořáku tak lze zadat i účinek požáru definovaného v Eurokódu 1 jako „t – kvadratický“ (ČSN EN 1991-1-2, 2006). Tento způsob zadání požáru nevyžaduje specifikaci požárnětechnických materiálových parametrů a často je pro svou jednoduchost preferován. Druhý způsob simulace rozvoje požáru lze označit jako **přímý výpočet kinetiky hoření** a jde o vysoce specifickou aplikaci programu FDS ve srovnání s dalšími požárními CFD modely, které využívají předchozího způsobu zadání požáru. Predikce rozvoje požáru je umožněna na základě definovaných kinetických parametrů hořlavých materiálů, které je pro simulace často nezbytné získat experimentálně (např. termogravimetrickou analýzou). FDS s využitím modelu pyrolýzy aproximuje jinak v reálu vysoce složitý mechanismus vzniku a zániku částic v průběhu řetězové heterogenní chemické reakce. Uvnitř mikrostruktury reálných turbulentních plamenů současně probíhají vysokofrekvenční procesy (iniciace, spalování, vyhořívání), a to jen v prostoru o velikosti jen několika málo milimetrů, a v daném čase a prostoru tak vzniká tisíce rozdílných stavů (Kučera & Pezdová, Základy matematického modelování požáru, 2010). Tato náročná úloha v oblasti CFD modelování je předmětem neustálého vývoje a jejímu využití je rovněž věnována samostatná část experimentální části této disertační práce (viz kapitola 3).

Radiační model přijímá rovněž značná kompromisní zjednodušení, neboť řešení transportu sálavého tepla je numericky náročné již pro dvoudimenzionální šedé médium. FDS řeší rovnice přenosu tepla radiací především právě pro šedé médium. Výpočet ovlivňují svými radiačními vlastnostmi (např. emisivita, pohltivost) jak pevné povrchy, tak proudící tekutina, tj. v případě požáru směs vzduchu a zplodin hoření. FDS dále využívá zadaný radiační podíl, jakožto část uvolněního tepla přenášeného radiací (více kapitola 3.5.5), a počet radiačních paprsků (standardně 100), v jejichž směru je transport uvažován.

Kapitola 3:

Experiment 1 – Laboratorní vs. matematický CFD model šachty

3.1 Úvod

Matematické CFD modely, označované též jako modely typu pole, jsou používány ve výzkumu i praxi stále častěji. S rozšiřujícím se využitím softwaru a stále se zvyšující úrovní technického a hardwarového poznání souvisí i potřeba ověřovat matematickou a uživatelskou správnost (tzv. **verifikace**) a míru shody mezi počítačovou predikcí a experimentálně získanými výsledky (tzv. **validace**).

Pro šachtový experiment je vybrán software – FDS (Fire Dynamics Simulator), a to především s ohledem na jeho klíčové výhody, mezi které patří zejména vysoká technická propracovanost, kontinuální mezinárodní vývoj po dobu více jak 30 let, snadná dostupnost, rozšiřující se uživatelská komunita a otevřený zdrojový kód (více předchozí kapitola 2.5.5).

S technickou propracovaností softwaru FDS souvisí i jeho značná uživatelská náročnost, která předpokládá pokročilou znalost v oblasti požárního inženýrství. Specifikace vstupních dat a správné zadání okrajových podmínek v počítačové simulaci bývají nejnáročnější výzvou, která rozhoduje o míře spolehlivosti spočtených dat a požár jakožto vysoce dynamický proces tuto skutečnost dále umocňuje. Pro software FDS jsou na různých výzkumných pracovištích prováděny požárně validační zkoušky pro nejrůznější oblasti jeho využití, avšak nejčastěji jde o zkoušky v uzavřeném prostoru objemového charakteru (např. místnost, skupina místností, atria apod.) nebo o zkoušky pro tunelové dopravní stavby s převládajícím délkovým rozměrem. Šachtový experiment provedený v rámci této disertační práce je realizován mimo jiné i právě jako podklad pro další zajímavou validaci.

Záměrem experimentu není, zejména s ohledem na výše popsané skutečnosti, porovnávat různé softwarové nástroje, ale zaměřit se na podrobnost jednoho kvalitního softwaru se snahou poskytnout informace a zkušenosti, které napomohou k jeho dalšímu vývoji. Na druhou stranu, požár v šachtovém prostoru skýtá značná specifika (zejména z hlediska turbulencí v úzkém a vysokém prostoru) a rizika výraznějších neshod mezi laboratorním a matematickým modelem jsou předem očekávána.

Šachtový experiment je ve všech jeho fázích proveden dvakrát. Poprvé je proveden v rámci doktorské zahraniční stáže v požárnětechnické laboratoři na Stord-Haugesundské univerzitě v Norsku (09/2009–02/2010). Experimentální fáze 1 je realizována úspěšně a její výsledky prezentovány na americkém sympoziu IAFSS (Pokorný, Husted, & Kraaijeveld, Comparison of Shaft Fire Experiment and CFD Modelling, 2011). Pro CFD simulaci je využit software FDS verze 5. S ohledem na technické problémy (zejména regulace řízeného zdroje požáru) v experimentální fázi 2 a 3 je rozhodnuto, že celý experiment s podobnými okrajovými podmínkami bude opětovně realizován v požárnětechnické laboratoři Centra stavebního inženýrství a. s. v Praze (08/2011) a bude využit software FDS v nejnovější testovací verzi 6 (tzv. beta verze).

3.1.1 Cíle experimentální části

1) *Realizace zjednodušeného laboratorního modelu*

Smyslem laboratorního modelu není reálné ztvárnění instalační šachty (tj. prostor s instalačními rozvody, revizními dvířky apod.), nýbrž zjednodušený model šachty s řízeným zdrojem požáru, který bude modifikovatelný pro základní konstrukční řešení (průběžná a členěná šachta) s možností implementace náhradního požárního zatížení pro sledování rozvoje požáru.

2) *Měření základních požárnětechnických veličin*

Bodové měření teplot, celkového dopadajícího tepelného toku (konvekce + radiace) a rychlost proudění od účinku řízeného požáru v modelu šachty.

3) *Sledování rozvoje požáru v průběžné šachtě*

Úprava modelu průběžné instalační šachty pro možnost sledování rozvoje požáru a rychlosti šíření plamene po povrchu náhradního požárního zatížení (částečné hořlavé opláštění šachty).

4) *Chování kouře a plamene v blízkosti stropní přepážky v členěné šachtě*

Zvyšující se teplota a hustota vrstvy kouře v šachtě může v případě netěsnosti ve stropní přepážce způsobovat přeskok plamene mezi podlažími. Tento jev a jeho zhodnocení je dílčím cílem konstrukčního řešení horizontálně členěné šachty.

5) *Realizace matematického CFD modelu*

Cílem matematického CFD modelu je s využitím softwaru FDS maximálně připodobnit (simulovat) chování požáru v laboratorním modelu a upozornit na problematiku úskalí.

6) *Porovnání získaných dat*

Porovnání laboratorních výsledků s daty získanými matematickou simulací požáru.

3.1.2 Rozfázování a zdůvodnění experimentu

Experiment je členěn do třech následujících fází, a to zejména s ohledem na základní konstrukční řešení instalačních šachet.

Fáze 1 – Průběžná šachta s nehořlavým opláštěním

Průběžná šachta je v této fázi navržena s nehořlavým opláštěním a jejím smyslem je ověřit míru shody mezi laboratorním měřením a počítačovou simulací, a to z hlediska bodového měření teplot, tepelného toku a rychlosti proudění od účinku řízeného požáru.

Fáze 2 – Průběžná šachta s částečným hořlavým opláštěním

Varianta A – šachta s hořlavou transparentní přední stěnou

Varianta B – šachta s hořlavou přední a boční stěnou

Smyslem obou variant je zejména ověřit schopnost tzv. submodelu hoření, tj. schopnost simulovat rozvoj požáru, a to i pro případ, kdy zdroj požáru je zcela odstraněn a samovolně hoří samotný materiál. Z pohledu matematického modelování požáru se jedná o jednu z nejnáročnějších úloh. Ve variantě B je navíc věnována pozornost rohovému účinku požáru s často velmi dramatickým průběhem (např. viz Obr. 2.4).

Fáze 3 – Členěná šachta s nehořlavým opláštěním

Členěná šachta s nehořlavým opláštěním je v této fázi doplněna o nehořlavou stropní přepážku s otvorem představující v praxi určitou míru netěsnosti kolem instalačních prostupů. Tuto netěsnost nejprve představuje otvor většího rozměru, který se v průběhu testu postupně uzavírá. Tímto vzniká přechod od požáru řízeného palivem k požáru řízenému ventilací. Smyslem je především ověření chování kouře pod a nad stropní přepážkou a riziko přeskoku plamene nad přepážku, tj. mezi podlažími v budově.

3.2 Laboratorní model

Tato kapitola podrobně popisuje geometrické řešení laboratorního (fyzikálního) modelu šachtového prostoru ve třech konstrukčních variantách (fázích) a plynový hořák jakožto řízený zdroj požáru uvnitř modelu šachty.

3.2.1 Popis laboratorního modelu

Půdorysná geometrie modelu šachty vychází z rozměrů běžné bytové instalační šachty a výška odpovídá přibližně výšce jednoho a půl patra (obr. 3.2). S ohledem na omezené laboratorní podmínky je laboratorní model konstruován přibližně v polovičním měřítku a ve stejném měřítku je prováděna i počítačová simulace.

Model šachty je vyzděn z pórobetonových příčkových tvárnic Ytong tl. 100 mm (pevnost P2-500, rozměr $100 \times 249 \times 599$ mm) kladených v ložných spárách na sucho. Vzhledem k vazbě zdiva a nutnosti řezání tvárnic jsou všechny styčné spáry a drobné netěsnosti v ložných spárách vyplněny požárněochranným intumescentním tmelem PROMASEAL Mastic z důvodu zajištění těsnosti opláštění šachty. Na rozích šachty jsou tvárnice vzájemně prošroubovány dlouhými vruty a dále zdivo po obvodě šachty sepnuto vázacím drátem, čímž je zajištěna stabilita a vyšší těsnost pláště šachty.

Plynulý přívod vzduchu pro hoření uvnitř šachty je zajištěn přívodním tunelem v dolní části šachty, jehož funkcí je především ustálení proudu vzduchu, tj. eliminace vzdušné turbulence v blízkosti plynového hořáku. Odvod spalin ze šachty zajišťuje otevřená horní část, která je pouze v případě členěné šachty doplněna stropní přepážkou.

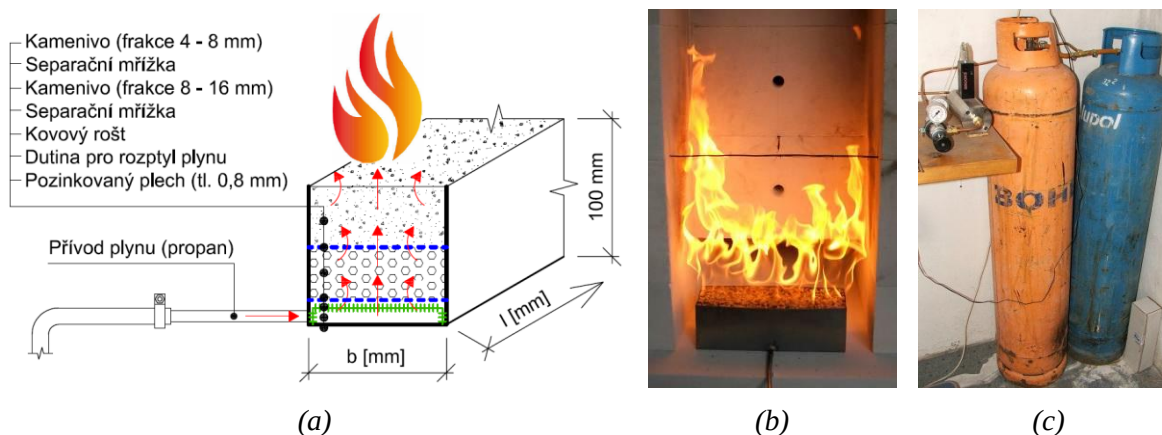
3.2.2 Řízený zdroj požáru – plynový hořák

Řízený zdroj požáru uvnitř šachty vytváří plynový propanový hořák situovaný na dno šachty v kontaktu s přední šachtovou stěnou. Hořák je tvořen kovovým tělem (pozinkovaný plech tl. 0,8 mm) s letovanými a přenýtovanými spoji se šterkovou výplní pro rovnoměrný rozptyl plynu přiváděného do spodní části hořáku (Obr. 3.1). Výkon a velikost hořáku pro jednotlivé fáze experimentu je odlišný. Výška hořáku je jednotná, a to 100 mm.

Pro fáze experimentu 1 a 3 (nehořlavé modely šachty) je zvolen hořák s konstantním tepelným výkonem 20 kW během celé zkoušky, který společně s půdorysnou (rozptylovou) plochou hořáku 100×200 mm vytváří žádoucí výšku plamenů pohybujících se v dolní polovině šachty. Vyšší výkon hořáku by mohl znamenat nežádoucí prošlehávání plamene mimo šachtu.

Pro fázi experimentu 2 (částečné hořlavé opláštění) je zvolen hořák s menším tepelným výkonem 6 kW, který slouží pouze jako iniciační zdroj zapálení hořlavé části opláštění a po určité době je vypnut. Půdorysná (rozptylová) plocha hořáku je 75×75 mm, čemuž odpovídá i menší výška plamene.

Přívod propanu z tlakových lahví do plynového hořáku prochází přes hmotnostní regulátor průtoku plynu, který je napojen přes měřicí ústřednu na řídicí počítač a udržuje tak požadovaný tepelný výkon hořáku (Obr. 3.1 (c)).



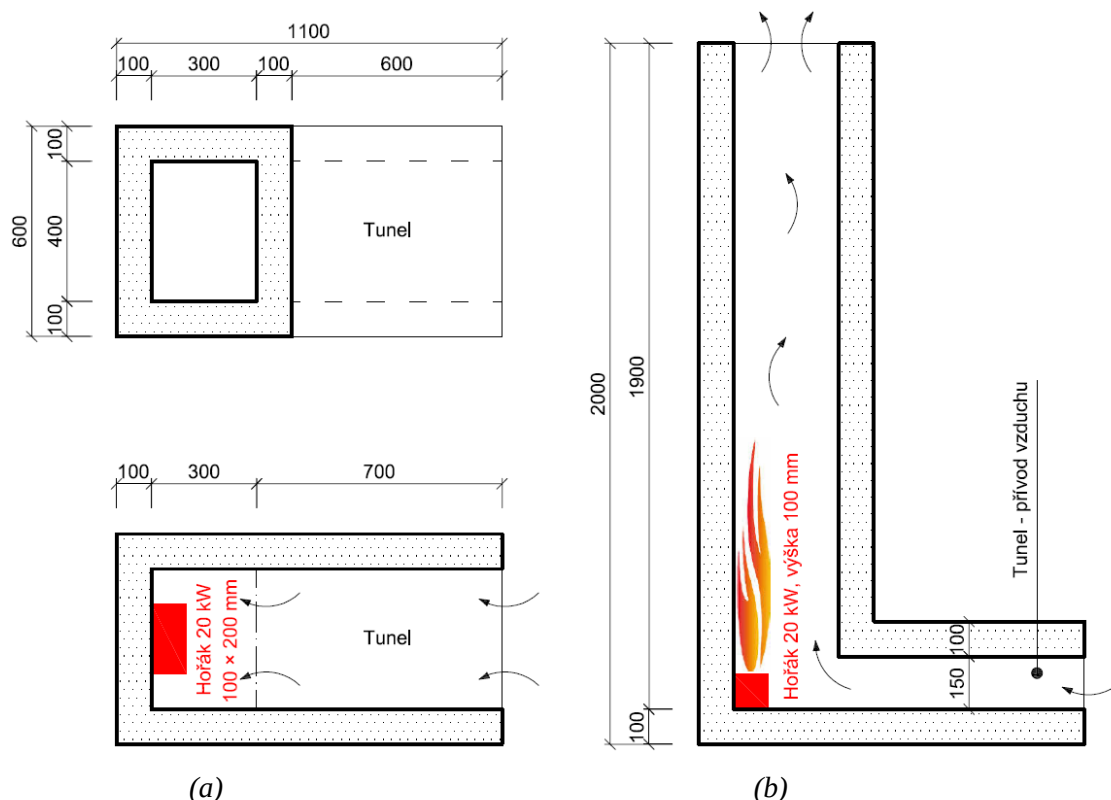
Obr. 3.1 Plynový propanový hořák: (a) příčný řez; (b) pohled na hořák pro fázi experimentu 1 a 3 s tepelným výkonem 20 kW ($100 \times 200 \times 100$ mm), v zadní šachtové stěně 2 otvory pro měřicí zařízení (radiometry); (c) tlakové propanové lahve s elektronicky řízeným hmotnostním průtokoměrem plynu napojeným na řídicí počítač

3.2.3 Průběžná šachta s nehořlavým opláštěním (Fáze 1)

Fáze experimentu 1 představuje model prázdného průběžného šachtového prostoru s nehořlavým opláštěním (Obr. 3.2) a nikoliv model reálné instalační šachty, ve kterém se běžně nachází značné požární zatížení v podobě instalačních rozvodů dnes nejčastěji z plastů.

Vnitřní rozměry šachty 400×300 mm vycházejí jednak z geometrické podobnosti s reálnou bytovou instalační šachtou a jednak z délkového a šířkového modulu pórobetonové cihly. Obdobně výška šachty 1900 mm vychází jednak z výškových možností interiéru požární laboratoře (odsávací VZT zvon nad šachtou) a jednak z výškového modulu pórobetonové cihly. Přívodní tunel má vnitřní průřez 400×150 mm a délku 600 mm.

Řízený zdroj požáru vytváří plynový propanový hořák ($100 \times 200 \times 100$ mm) s tepelným výkonem 20 kW nepřerušeným během celého experimentu.



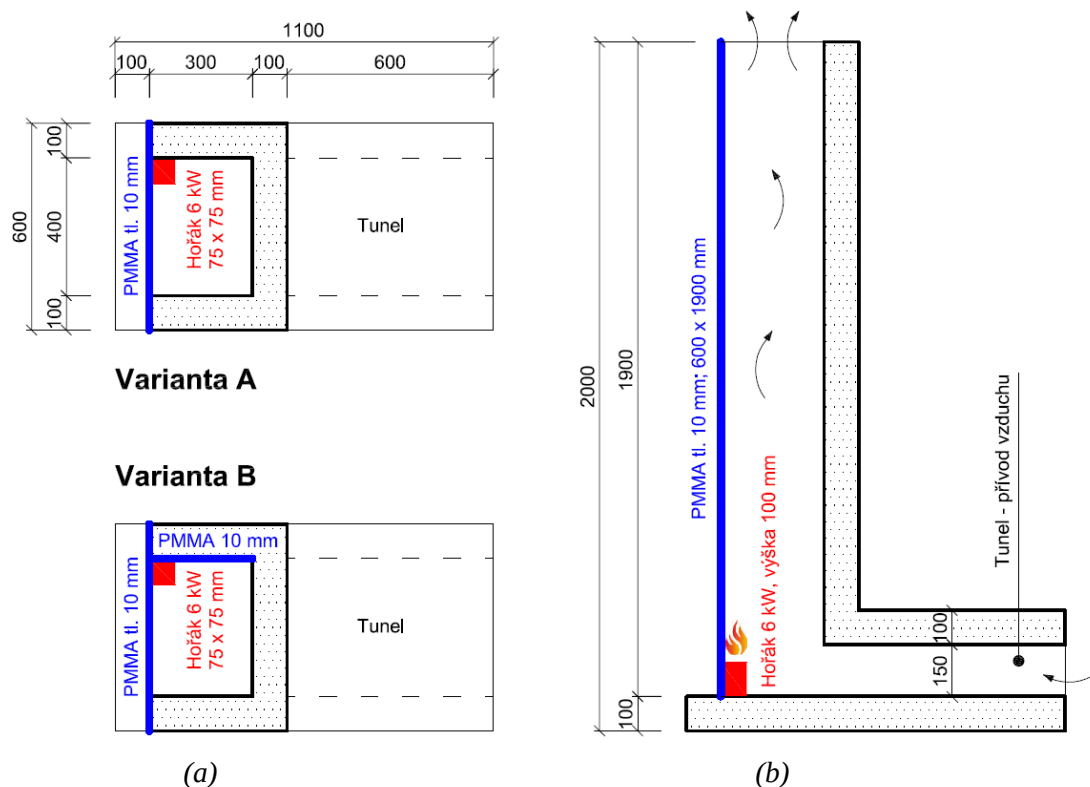
Obr. 3.2 Laboratorní model – průběžná šachta (Fáze 1): (a) půdorys v úrovni přívodního tunelu (dolní obr.) a v úrovni šachty (horní obr.); (b) svislý řez

3.2.4 Průběžná šachta s částečným hořlavým opláštěním (Fáze 2)

Fáze experimentu 2 navazuje na geometrii modelu průběžné šachty (fáze 1) a je řešena ve dvou konstrukčních variantách (A, B). Pro obě varianty je odstraněna přední zděná šachtová stěna a nahrazena transparentní hořlavou deskou tl. 10 mm z PMMA (polymetylmetakrylát) šířky 600 a výšky 1 900 mm pro možnost sledování rozvoje požáru v šachtě (Obr. 3.3). Deska z PMMA je zvolena s ohledem na pozitivní zkušenost z prvního experimentu realizovaného v zahraničí, kde byla použita nejprve deska z polykarbonátu tl. 3 mm. Tepelné namáhání této desky způsobovalo značné deformace (boulení) v okolí hořáku a hlavně nebylo dosaženo tíženého efektu šíření plamene po povrchu desky. Podrobnější požárnětechnická charakteristika PMMA je uvedena v kapitole 3.5.3.

Varianta B je navíc specifická dalším hořlavým povrchem v šachtě – deskou (PMMA tl. 10 mm) ukotvenou na boční šachtovou stěnu, čímž je vytvořen rohový účinek požáru, u kterého je předpokládán výrazně rychlejší a dramatictější rozvoj požáru.

Pro obě varianty je velmi důležité dobré utěsnění v místě napojení desky z PMMA na podkladní pórobetonové zdivo a v místě vzájemného napojení desek. V opačném případě by mohlo docházet například k přísávání vnějšího vzduchu do šachty či hoření okrajů desek, které je výrazně snazší než hoření v ploše desky. V obou variantách A i B je využit menší hořák ($75 \times 75 \times 100$ mm) s nižším tepelným výkonem (6 kW), jehož úkolem je zapálení povrchu desek z PMMA. Po určité době (5 minut pro variantu A, 3 minuty pro variantu B) je hořák vypnut a následně sledováno šíření plamene po povrchu desek.



Obr. 3.3 Laboratorní model – průběžná šachta s hořlavým opláštěním (Fáze 2):
(a) půdorysy, Varianta A – hořlavá přední stěna, Varianta B – hořlavá přední a boční stěna; (b) svislý řez

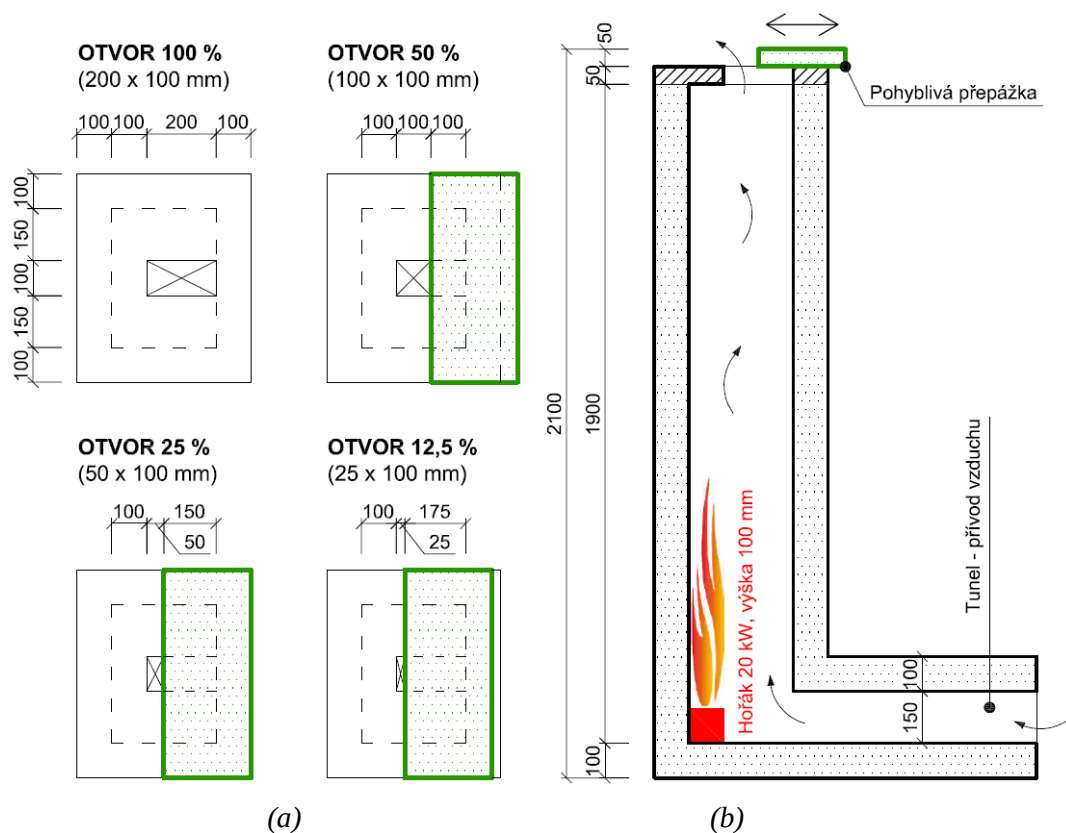
3.2.5 Členěná šachta s nehořlavým opláštěním (Fáze 3)

Fáze experimentu 3, stejně jako fáze 1 (průběžná šachta), představuje model prázdného šachtového prostoru s nehořlavým opláštěním, který je však v horní části šachty zakončen horizontální přepážkou (Obr. 3.4). Tato úprava zjednodušeně představuje v praxi časté konstrukční řešení horizontálně členěné šachty, kde se v přepážce běžně nachází velké množství instalačních prostupů.

Z hlediska vertikálního šíření požáru představují riziko netěsnosti kolem prostupů (požární mosty), které mohou vznikat ve fázi chybné realizace nebo ve fázi požáru vlivem odhoření části instalací z plastických hmot. Stropní přepážka pak představuje v šachtě bariéru, pod kterou se v případě požáru kumuluje vrstva kouře a zvyšuje se její hustota a teplota. Netěsnost v přepážce představuje podmínku pro vznik komínového efektu v šachtě a pro plamen i další zdroj kyslíku, pro který si může „sáhnout“ nad přepážku do vyššího podlaží. Tento efekt je často diskutován v souvislosti s požárními ucpávkami v místě prostupů instalací na bázi plastů (zejména kanalizační potrubí a kabelové svazky) skrz požárně dělicí konstrukci.

Přepážka je vytvořena z železobetonové desky tl. 50 mm s otvorem o velikosti 100 × 200 mm, který představuje zjednodušeně zmíněnou netěsnost. Aby mohl být sledován vliv velikosti netěsnosti, je v průběhu experimentu otvor uzavírán pohyblivou částí přepážky, která otvor v pevné části přepážky skokovým posuvem uzavírá na 50, 25 a 12,5 % jeho původní velikosti (Obr. 3.4 (a)). Pro pohyblivou přepážku je použita pórobetonová příčková tvárnice Ytong tl. 50 mm (pevnost P4-500, rozměr 50 × 249 × 599 mm).

Řízený zdroj požáru vytváří, stejně jako pro fázi 1 (průběžná šachta), plynový propanový hořák (100 × 200 × 100 mm) s tepelným výkonem 20 kW nepřerušným během celého experimentu.



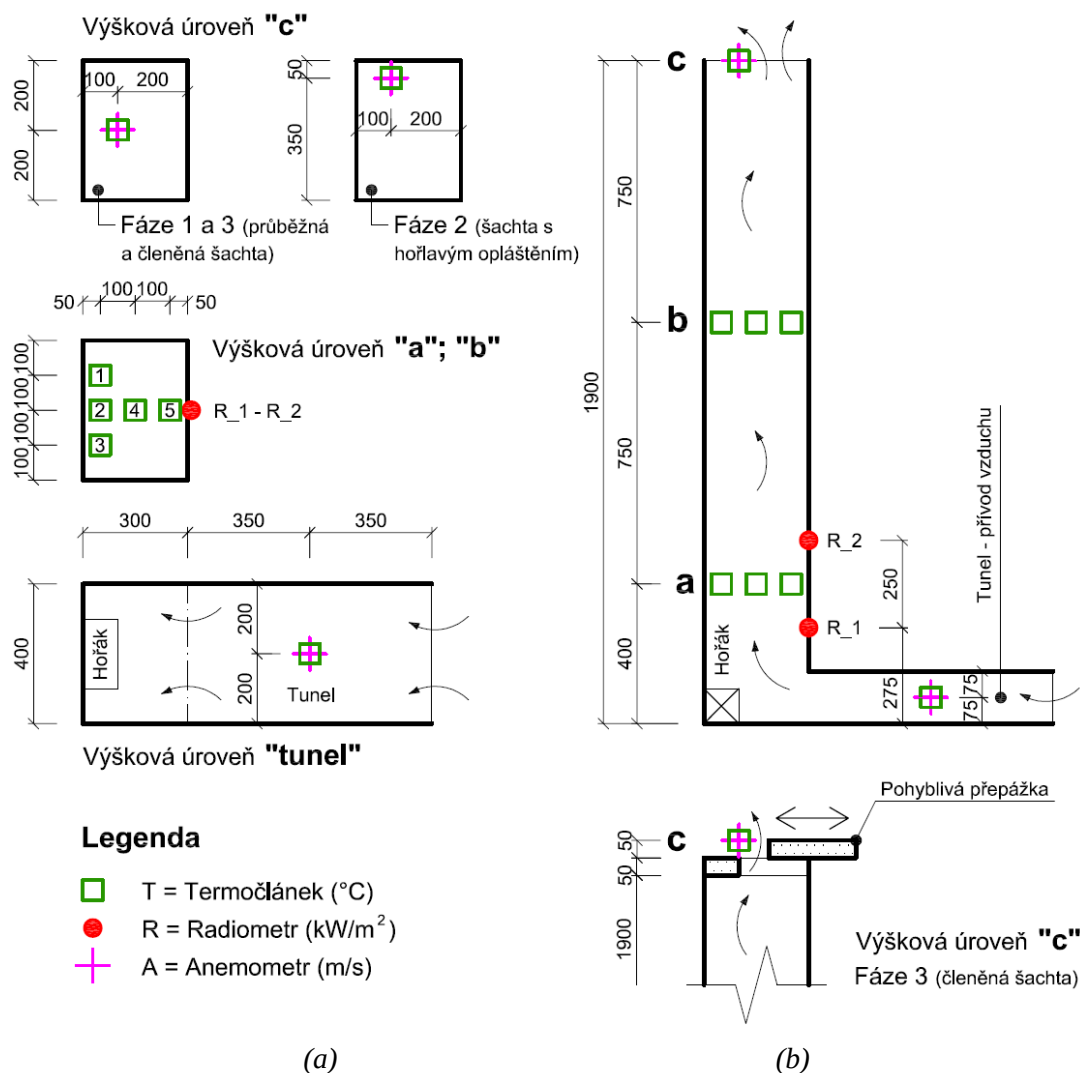
Obr. 3.4 Laboratorní model – členěná šachta (Fáze 3): (a) půdorysný pohled na stropní přepážku s otvorem se čtyřmi polohami pohyblivé části přepážky; (b) svislý řez

3.3 Měřicí zařízení a okrajové podmínky měření

Během jednotlivých fází experimentu jsou **měřeny následující požárnětechnické veličiny**:

- **teplota** uvnitř šachty v 11 bodech; pro fázi experimentu 1 je přidán 1 další měřicí bod v tunelu pro přívod vzduchu;
- **rychlost proudění vzduchu** uvnitř šachty v 1 bodě; ve fázi experimentu 1 je přidán 1 další měřicí bod v tunelu pro přívod vzduchu;
- **celkový dopadající tepelný tok** na svislé ose zadní šachtové stěny ve 2 bodech.

Všechna měřicí zařízení jsou znázorněna na následujícím schématu (Obr. 3.5) a označena dle typu zařízení a svého výškového, případně půdorysného umístění v šachtě. V dále prezentovaných výsledcích jsou pro jednotlivé měřicí body používány zkratky, jako například T_b_2 (lab), kde „T“ označuje typ měřicího zařízení – termo-elektrický článek („R“ = radiometr, tj. zařízení pro měření tepelného toku; „A“ = anemometr, tj. zařízení pro měření rychlosti proudění vzduchu) na výškové úrovni „b“ a v půdorysné poloze „2“. Zkratka „(lab)“ označuje veličinu měřenou v laboratoři a zkratka „(fds)“ hodnotu získanou matematickou simulací v softwaru FDS.

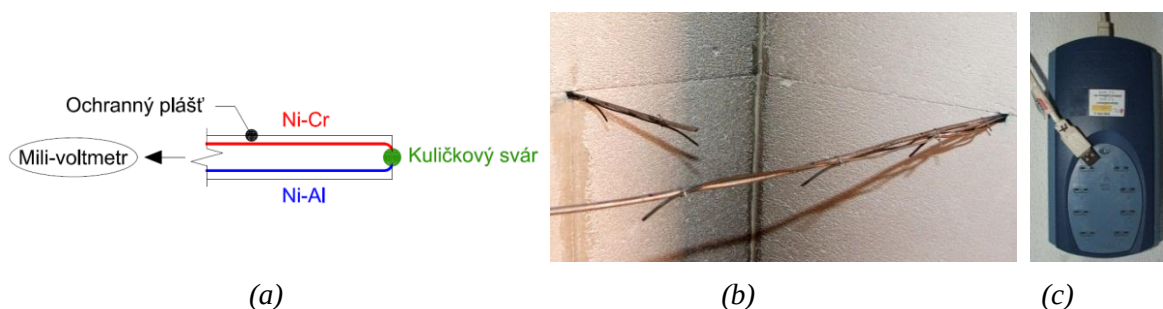


Obr. 3.5 Uspořádání a označení měřicích zařízení v modelu šachty: (a) půdorysy různých výškových úrovní; (b) řez průběžnou šachtou a členěnou šachtou v místě přepážky (poznámka: měřicí zařízení v tunelu pouze pro fázi experimentu 1)

Umístění většiny měřicích zařízení je pro všechny fáze experimentu totožné (Obr. 3.5) s výjimkou třech případů. První odlišnost je ve fázi experimentu 1 (průběžná šachta), kde je navíc využit příruční datalogger (anemometr + termometr), který umožňuje bodové měření rychlosti proudění a teploty v přívodním tunelu, tj. v prostředí za okolní teploty. Měřicí rozsah dataloggeru neumožňuje měření v prostředí za vysokých teplot, a proto není využitelný během fáze experimentu 2 a 3, při kterých by mohlo dojít k poškození přístroje například vlivem prošlehnutí plamene tunelem. Druhá odlišnost je ve fázi experimentu 2 (šachta s hořlavým opláštěním), kde na výškové úrovni „c“ je posunut měřicí bod (termočlánek + anemometr) blíže k boční šachtové stěně nad plynový hořák, kde je očekávána rychlost proudění nejvyšší. Poslední třetí odlišnost v rozmístění měřicích zařízení je ve fázi experimentu 3 (členěná šachta), kde měřicí zařízení na výškové úrovni „c“ (anemometr + termočlánek) je ve stejné půdorysné poloze jako ve fázi 1, avšak vertikálně posunuto o 100 mm výše nad otvor v přepážce. Důvodem je zejména očekávané turbulentní chování kouře pod přepážkou, které by bylo obtížně měřitelné a porovnatelné s matematickým modelem kvůli velkým fluktuacím sledovaných veličin. Naopak proudění procházející otvorem v přepážce již mělo mít charakter více podobný ustálenému laminárnímu proudění.

3.3.1 Měření teplot

Pro měření vysokých teplot v šachtě je použito **11 plášťovaných dvoudrátových termo-elektrických článků** typu „K“ (dále jen termočlánek). Na výškové úrovni „a“ (0,4 m nad dnem šachty) a „b“ (1,15 m nad dnem šachty) je umístěna skupina pěti termočláneků, na výškové úrovni „c“ (1,9 m, resp. 2 m nad dnem šachty) pak 1 termočlánek. Pro dolní skupinu termočláneků (výšková úroveň „a“) jsou použity termočlánky průměru 0,5 mm, pro horní skupinu (výšková úroveň „b“ a „c“) termočlánky průměru 1,5 mm.



Obr. 3.6 Měření teploty: (a) schematický průřez plášťovaného termo-elektrického článku typu „K“; (b) pohled na horní skupinu 5 termočláneků (výšková úroveň „b“) průměru 1,5 mm uchycených na 2 nosné dráty jdoucích skrz šachtu; (c) měřicí ústředna pro sběr dat z termočláneků a horní rychlostní sondy (anemometr)

Obecně, termočlánek typu „K“ je tvořen dvěma větvemi (dráty), z čehož jedna je slitinou niklu a chromu (Ni-Cr) a druhá niklu a hliníku (Ni-Al). Obě větve s různou vodivostí jsou na konci bodově vzájemně spojeny nejčastěji kuličkovým svarem (Obr. 3.6 (a)) a princip měření teploty je založen na změně napětí mezi větvemi vyvolané změnou teploty. Tato diference v napětí je přepočítávána na teplotu. Čím tenčí jsou termočlánekové dráty, tím je rychlejší odezva termočláneků na změnu teploty a měření je tak citlivější. Z tohoto důvodu jsou termočlánky s menším průměrem (0,5 mm) umístěny blíže k hořáku, aby mohly rychleji reagovat na teplotu plamene. Všechny používané termočlánky jsou kalibrovány od výrobce a i v rámci experimentu je průběžně kontrolována jejich funkčnost.

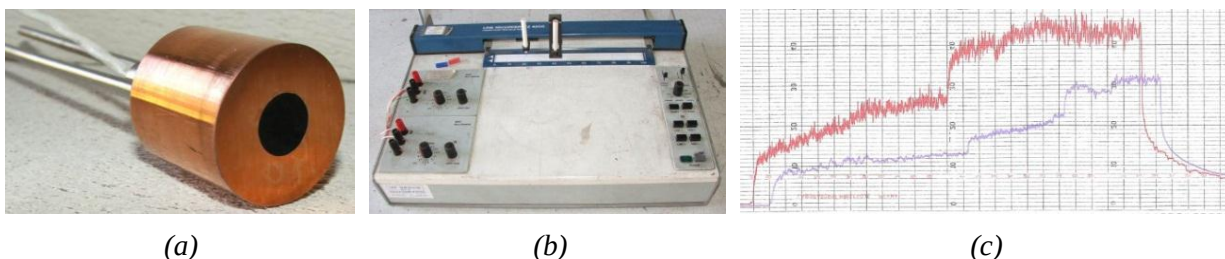
Termočlánky jsou napojeny na 2 měřicí ústředny (Obr. 3.6 (c)), ve kterých jsou teploty snímány v 1vteřinovém intervalu a následně ukládány do počítače. Ústředny společně s ovládacím softwarem v počítači přepočítávají výstupní signál změny napětí (mV) přímo na teplotu (°C).

Ve fázi experimentu 1 (průběžná šachta) je navíc měřena i teplota přiváděného vzduchu uprostřed tunelu (Obr. 3.5), a to pomocí příručního dataloggeru (Obr. 3.9 (a)).

3.3.2 Měření tepelného toku

Celkový tepelný tok (radiace + konvekce) je v experimentu měřen pomocí 2 nových **vodou chlazených radiometrů Schmidt-Boelterova typu** s měřicím rozsahem 0–50 kW/m² (Obr. 3.7 (a)), které jsou umístěny na svislé ose zadní šachtové stěny. První radiometr s označením „R_1“ je umístěn do blízkosti hořáku, a to 275 mm nad dno šachty, druhý radiometr „R_2“ o 250 mm výše (Obr. 3.5). V zadní šachtové stěně je vyvrtán otvor a radiometr provlečen otvorem tak, aby jeho čelní strana s měřicím senzorem (černá kruhová plocha) lícovala s vnitřním povrchem stěny. Senzor jednak absorbuje dopadající tepelný tok (konvekční i radiační složku), který je

přeměňován na teplo proudící do těla radiometru, a jednak generuje výstupní signál jako změnu elektrického napětí, který je přímo úměrný tepelnému toku. Kovové tělo radiometru je vnitřně chlazené cirkulující vodou pro eliminaci jeho přehřívání a udržení neměnné úrovně referenčního prostředí, ke které je v daný časový okamžik měřená hodnota vztažena. V zadní části těla radiometru se nachází dvě kovové trubičky pro přívod studené a odvod nahřáté vody a dále kabel pro připojení na sběrnici dat.



Obr. 3.7 Měření tepelného toku: (a) vodou chlazený radiometr (Schmidt-Boelterův typ); (b) liniový zapisovač pro sběr dat; (c) příklad záznamu měřených hodnot v liniovém zapisovači na laboratorní papír

Z technických důvodů není možnost napojit radiometry na stejné ústředny jako termočlánky, ale jako sběrnice dat je použit liniový zapisovač (Obr. 3.7 (b)). Tento přístroj provádí zápis (zákres) průběhu změny elektrického napětí do grafu na laboratorní papír (Obr. 3.7 (c)). Celkovou hustotu tepelného toku dopadající na měřicí čočku radiometru je pak možné vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\dot{q}^{\parallel} = k \cdot U \quad (3.1)$$

kde: $\dot{q}^{\parallel}$ – hustota tepelného toku (kW/m²)

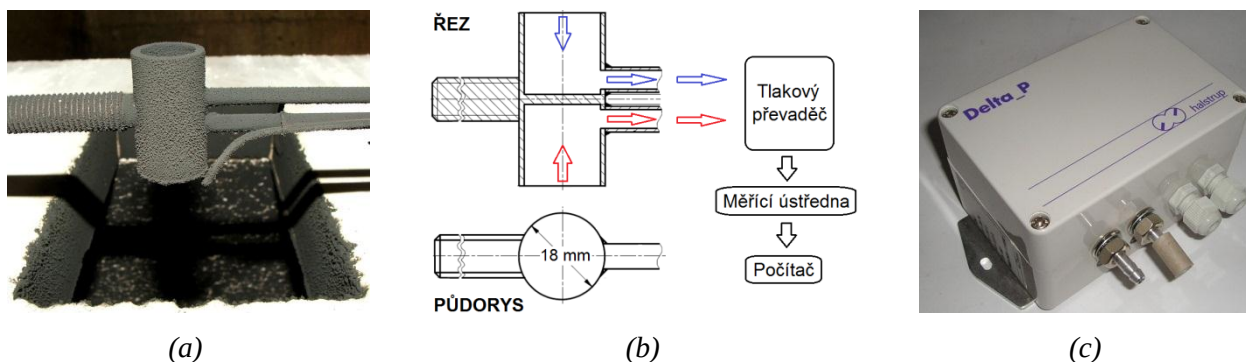
k – kalibrační konstanta použitého radiometru (kW/m²/mV)

$k = 5,618$ pro radiometr R_1; $k = 5,899$ pro radiometr R_2

U – měřená hodnota elektrického napětí (mV); zákres na laboratorní papír (Obr. 3.7 (c))

3.3.3 Měření rychlosti proudění

Rychlost proudění vzduchu je měřena v horní části šachty na výškové úrovni „c“ (1,9 m, resp. 2 m nad dnem šachty). V podmínkách požáru vyžaduje toto měření specifický způsob, jelikož běžné anemometry jsou konstruovány pro měření za běžných teplot. Používány jsou tzv. **obousměrné rychlostní sondy**, které jsou tvořeny dutým otevřeným kovovým tělem ve tvaru válce s vnitřní přepážkou (Obr. 3.8 (a), (b)). Z boční strany sondy vystupují 2 kovové duté trubice, jedna nad a druhá pod přepážkou, které zajišťují propojení sondy s tlakovým převaděčem. Proudící vzduch vstupující do sondy z jedné či druhé strany vyvolá skrze trubice změnu tlaku v převaděči a ten poskytuje výstupní signál jako změnu elektrického napětí. V experimentu je tlakový převaděč (Obr. 3.8 (c)) napojen na jednu z měřících ústředěn jako v případě termočlánků a výstupní signál změny elektrického napětí je ukládán přímo do počítače. S využitím kalibrační konstanty lze provést přepočet změny napětí na změnu tlaku a následně se znalostí teploty v daném místě (termočlánek v blízkosti sondy – Obr. 3.8 (a)) výpočet rychlosti proudění.



Obr. 3.8 Měření rychlosti proudění: (a) obousměrná rychlostní sonda (vnitřní průměr 18 mm) na výškové úrovni „c“; na této fotografii sonda nad otvorem v přepážce (fáze 3); v pravé spodní části sondy umístěn termočlánek typu „K“ průměru 1,5 mm; (b) půdorys a řez rychlostní sondou; (c) tlakový převaděč

Rychlost proudění vzduchu lze spočítat s využitím následujícího poměrně komplikovaného postupu (Emmons & Tanaka, 2008), (McCafferey & Heskestad, 1976):

$$u = \frac{1}{K_P} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T}{353}} \quad (3.2)$$

kde: u – rychlost proudění (m/s)

K_P – korekční faktor (-)

$$K_P = 0 \text{ pro } Re \leq 40 \quad (3.3)$$

$$K_P = 1,08 \text{ pro } Re \geq 3\,800 \quad (3.4)$$

$$K_P = -2,484 \cdot 10^{-17} \cdot Re^5 + 2,555 \cdot 10^{-13} \cdot Re^4 - 9,706 \cdot 10^{-10} \cdot Re^3 + 1,688 \cdot 10^{-6} \cdot Re^2 - 1,366 \cdot 10^{-3} \cdot Re + 1,533 \quad (3.5)$$

Δp – rozdíl tlaku měřený rychlostní sondou (Pa)

T – teplota měřená v blízkosti rychlostní sondy (K)

$$\Delta p = \frac{U}{k} \quad (3.6)$$

kde: U – změna elektrického napětí (V) – měřená hodnota

$k = 0,02$ – kalibrační konstanta použitého tlakového převaděče (V/Pa)

$$Re = \frac{353 \cdot u \cdot D}{T \cdot \mu} \quad (3.7)$$

kde: Re – Reynoldsovo číslo (-)

u – rychlost proudění (m/s) – ve vztahu (3.7) se jedná o odhadnutou hodnotu

D – vnitřní průměr rychlostní sondy (mm)

$$\mu = \mu_o \cdot \frac{0,555 \cdot T_o + C}{0,555 \cdot T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{3/2} \quad (3.8)$$

kde: μ – dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu (centipoise)

(1 centipoise = 0,001 kg/m/s)

$\mu_o = 0,01827$ centipoise – referenční viskozita vzduchu při referenční teplotě T_o

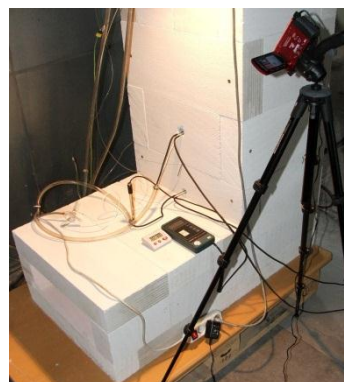
$T_0 = 524,07$ °R (stupeň Rankina) – referenční teplota (konstanta pro standardní vzduch)

T – teplota měřená v blízkosti rychlostní sondy (°R)

$C = 120$ – Sutherlandova konstanta (-)



(a)



(b)

Obr. 3.9 Měření v tunelu pro přívod vzduchu (pouze ve fázi experimentu 1): (a) příruční datalogger pro měření rychlosti proudění a teploty v tunelu (zařízení bez možnosti záznamu dat); (b) pohled na přívodní tunel a datalogger – záznam měřených dat na videokameru

Pro výpočet rychlosti proudění v šachtě je nejprve nutné stanovit Reynoldsovo číslo, avšak ze vztahu (3.7) je patrné, že pro jeho stanovení je potřeba znát rychlost proudění, kterou se však snažíme spočítat, a tudíž nemůže být známa. V této fázi je jediné řešení iterační postup, tj. odhadnutí rychlosti proudění, výpočet dle vztahů (3.2)–(3.8) a následné porovnání odhadnuté a spočtené hodnoty rychlosti proudění. Rozdíl mezi oběma hodnotami by se měl v limitě blížit nule. Tento typ výpočtu při datech snímaných ve frekvenci 1 s je reálné provádět pouze s využitím tabulkového procesoru. V rámci experimentu jsou data hodnocena v programu Microsoft Excel a s využitím programovacího prostředí Visual Basic je nadefinováno makro, jehož úkolem je provedení iteračního výpočtu takovým způsobem, aby rozdíl mezi odhadnutou a spočtenou hodnotou byl minimální (nadefinována hodnota rozdílu cca $0 \pm 1 \cdot 10^{-5}$ m/s).

Ve fázi experimentu 1 (průběžná šachta) je navíc měřena i rychlost proudění přiváděného vzduchu uprostřed tunelu (Obr. 3.5), a to pomocí příručního dataloggeru (Obr. 3.9).

3.3.4 Specifikace použitých měřicích zařízení

Všechna výše popsaná a použitá měřicí zařízení (Tab. 3.1) jsou pro experiment poskytnuta požárnětechnickou laboratoří CSI a. s. a jsou kalibrována.

Tab. 3.1 Specifikace použitých měřicích zařízení

Specifikace zařízení	Výrobce	Typ	Kalibrace	Poznámka
Termočlánky	T.M.H. GmbH	typ „K“ $\varnothing 0,5$ a $1,5$ mm	Ano	Obr. 3.6
Měřicí ústředna (záznam teplot a rychlosti proudění)	OMEGA	TC-08	Ano	Obr. 3.6
Radiometry	MEDTHERM	Schmidt-Boelter $0-50$ kW/m ²	Ano	Obr. 3.7

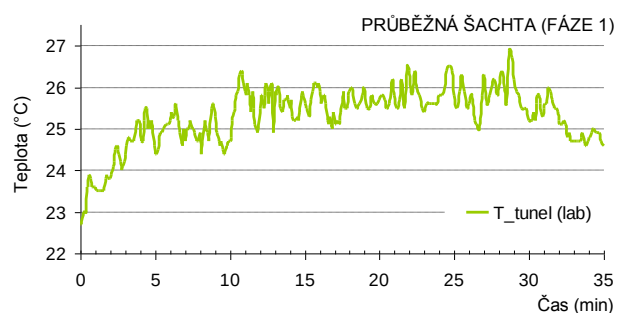
<i>Liniový zapisovač (záznam tepelného toku)</i>	<i>Laboratorní přístroje Praha</i>	<i>LINE RECORDER TZ</i>	Ano	Obr. 3.7
<i>Obousměrná rychlostní sonda, vnitřní ø 18 mm</i>	-	(ČSN EN 14390, 2007)	-	Obr. 3.8
<i>Tlakový převaděč</i>	HALSTRUP	PU Delta_P	Ano	Obr. 3.8
<i>Hmotnostní regulátor průtoku plynu</i>	BROOKS	-	Ano	Obr. 3.1

3.3.5 Okrajové podmínky měření

Všechny tři fáze experimentu jsou provedeny 18. a 19. srpna 2011 v uzavřeném prostoru požárnětechnické laboratoře v CSI a. s. v Praze Hostivaři (Obr. 3.10 (a)). Zkušební prostor je po třech stranách ohraničen nehořlavými ochrannými zástěnami a v horní části opatřen vzduchotechnickým odtahem zplodin hoření. VZT ventilátor není v průběhu experimentů zapnut z důvodu nežádoucího zvyšování rychlosti proudění v šachtě a odvod zplodin hoření je umožněn pouze přirozeným způsobem.



(a)



(b)

Obr. 3.10 (a) požárnětechnická laboratoř CSI a. s. v Praze Hostivaři – ohraničený zkušební prostor pro požární experimenty; v horní části vzduchotechnický odtah zplodin hoření; (b) teplota vzduchu v přívodním tunelu (počáteční teplota cca 23 °C odpovídá vnitřní teplotě v laboratoři)

Pórobetonové tvárnice Ytong jsou zakoupeny cca měsíc před experimentem a rozloženy na chráněném dobře větraném místě pro možnost vysychání. Teplota vnitřního prostředí v laboratoři se v průběhu fáze experimentu 1 pohybuje kolem cca 23 °C a lze ji odečíst jako počáteční teplotu zaznamenanou dataloggerem v tunelu pro přívod okolního vzduchu (Obr. 3.10 (b)). Teplota v tunelu postupně vzrůstá na max. 27 °C, a to díky radiaci tepla od hořáku a ohřívání zděného pláště šachty. Pro fáze experimentu 2 a 3 je teplota vnitřního prostředí v laboratoři obdobná.

Model šachty je postaven cca 0,5 m vedle boční plechové zástěny (Obr. 3.10 (a)) a cca 1 m před zadní stěnu vymezující zkušební prostor. Přívod vzduchu je předpokládán za dostatečný a blízké zástěny by měly rovnoměrnost proudu vzduchu ovlivňovat minimálně.

3.4 Průběh laboratorních zkoušek

Každá fáze experimentu má svůj charakteristický časový průběh. U fáze experimentu 1 a 3 (nehořlavé opláštění šachty) délka experimentu vychází ze zvolené doby chodu hořáku a doby pro chladnutí vnitřního prostoru šachty (cca 5 min) po vypnutí hořáku. U fáze experimentu 2 (částečné hořlavé opláštění šachty) délka experimentu vychází z charakteru rozvoje plamene po povrchu PMMA a v rizikovém okamžiku je zkouška z bezpečnostních důvodů ukončena. V následujících odstavcích je uveden časový průběh pro jednotlivé fáze experimentu.

Fáze 1 – Průběžná šachta s nehořlavým opláštěním (Obr. 3.11 (a))

Čas (min)	Specifikace
-	<i>Spuštění záznamu na videokameře, časomíry a měřicích zařízení</i>
0	<i>Spuštění hořáku 20 kW</i>
30	Vypnutí hořáku; <i>následuje fáze chladnutí šachty</i>
35	<i>Ukončení záznamu dat</i>

Fáze 2 – Varianta A – Průběžná šachta s hořlavou přední stěnou (Obr. 3.11 (b))

Čas (min)	Specifikace
-	<i>Spuštění záznamu na videokameře, časomíry a měřicích zařízení</i>
0	<i>Spuštění hořáku 6 kW</i>
5	Vypnutí hořáku; <i>dále již hoří pouze přední hořlavá stěna z PMMA</i>
15	<i>Prohoření přední stěny; uhašení plamene; ukončení záznamu dat</i>

Fáze 2 – Varianta B – Průběžná šachta s hořlavou přední a boční stěnou (Obr. 3.11 (c))

Čas (min)	Specifikace
-	<i>Spuštění záznamu na videokameře, časomíry a měřicích zařízení</i>
0	<i>Spuštění hořáku 6 kW</i>
3	Vypnutí hořáku; <i>dále již hoří pouze přední a boční hořlavá stěna z PMMA</i>
8:40	<i>Prliš vysoké teploty pro rychlostní sondu; uhašení plamene; ukončení záznamu dat</i>

Fáze 3 – Členěná šachta s nehořlavým opláštěním (Obr. 3.11 (d))

Čas (min)	Specifikace
-	<i>Spuštění záznamu na videokameře, časomíry a měřicích zařízení</i>
0	<i>Spuštění hořáku 20 kW; otvor v přepážce 100 × 200 mm (otevření 100 %)</i>
4	<i>Posun pohyblivé části přepážky; otvor v přepážce 100 × 100 mm (otevření 50 %)</i>
8	<i>Posun pohyblivé části přepážky; otvor v přepážce 100 × 50 mm (otevření 25 %)</i>
12	<i>Posun pohyblivé části přepážky; otvor v přepážce 100 × 25 mm (otevření 12,5 %)</i>
16	Vypnutí hořáku; <i>následuje fáze chladnutí šachty</i>
21	<i>Ukončení záznamu dat</i>



Obr. 3.11 Laboratorní model instalační šachty: (a) fáze 1 – průběžná nehořlavá šachta; (b) fáze 2 – varianta A – průběžná šachta s hořlavou transparentní přední stěnou (deska z PMMA tl. 10 mm); (c) fáze 2 – varianta B – pohled na hořlavou boční stěnu (deskový obklad z PMMA tl. 10 mm); fotografie zatím bez přední hořlavé stěny; (d) fáze 3 – členěná šachta – pohled na horní betonovou přepážku tl. 50 mm s otvorem (minimální procento otevření otvoru 12,5 %) a na pohyblivou část přepážky (tvárnice Ytong tl. 50 mm)

3.5 Popis matematického CFD modelu šachty

3.5.1 Použitý software

V rámci matematické CFD simulace je využita nejaktuálnější „šestková“ testovací tzv. beta verze softwaru FDS 6.0.0 (Fire Dynamics Simulator). V současné době je veřejně dostupná „pětková“ verze softwaru FDS 5.5.3 a vizualizační program SMV 5.6 (Smokeview). Testovací beta verzí se rozumí numericky zdokonalené rozhraní, které je před zveřejněním poskytnuto partnerským subjektům (zejména výzkumným pracovištím), a částečně tak prochází aktualizací verifikačního procesu (numerická a uživatelská „správnost“) a jednak procesem validačního charakteru na základně experimentálně získaných dat. Pro možnost poskytnutí dat validačního charakteru z šachtového experimentu je zvolena tato testovací verze FDS6.0.0 a pro vizualizaci spočetných výsledků stávající verze SMV 5.6. Obecné charakteristice programu FDS je věnována samostatná kapitola 2.5.5.

3.5.2 Tepelnětechnická charakteristika použitých materiálů

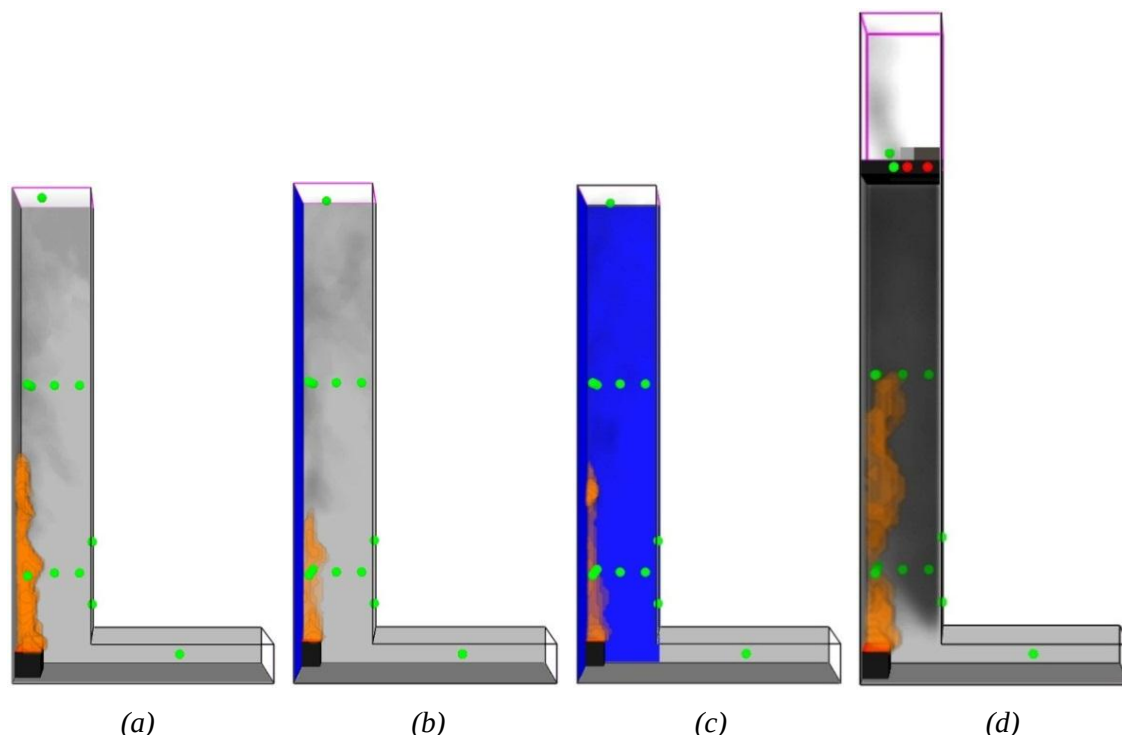
Pro opláštění modelu šachty jsou použity tři základní konstrukční materiály (výrobky), jejichž základní tepelnětechnické parametry jsou nezbytné vstupní údaje pro CFD výpočet (Tab. 3.2). Pro nehořlavou část opláštění šachty (tj. dno, stěny, strop nad tunelem pro přívod vzduchu a posuvná část stropní přepážky) jsou použity pórobetonové tvárnice Ytong, pro částečně hořlavé opláštění šachty (přední a boční stěna) desky z PMMA (výrobce KOPLAST spol. s r. o.) a pro pevnou část stropní přepážky s otvorem na míru provedená deska ze slabě vyztuženého betonu.

V CFD simulaci nejsou přímo modelovány ohraničující konstrukce šachty (dno, stěny, strop nad tunelem) v jejich reálných tloušťkách, avšak jsou definovány svými vlastnostmi jako hranice výpočetní oblasti. Při vizualizaci (Obr. 3.12) jsou pak zobrazeny jako různě barevné ohraničující povrchy (roviny), avšak v rámci výpočtů (např. kondukce tepla skrz konstrukci) jsou uvažovány

jejich reálné vlastnosti a rozměry. Tato metoda zmenšuje výpočetní oblast, a výrazně tudíž zkracuje již tak časově náročné CFD výpočty.

Tab. 3.2 Tepelnětechnické parametry konstrukčních materiálů použitých pro opláštění šachty

<i>Materiál (výrobek)</i>	<i>Součinitel tepelné vodivosti λ (W/m/K)</i>	<i>Měrná tepelná kapacita c (kJ/kg/K)</i>	<i>Objemová hmotnost ρ (kg/m³)</i>
Ytong	0,12	1,0	500
PMMA	viz Tab. 3.3		
Beton	1,3	1,02	2 300



Obr. 3.12 Model šachty ve vizualizačním programu SMV:
 (a) fáze 1 – průběžná šachta s nehořlavým opláštěním;
 (b) fáze 2 – varianta A – průběžná šachta s hořlavou přední stěnou z PMMA;
 (c) fáze 2 – varianta B – průběžná šachta s přední a boční hořlavou stěnou z PMMA;
 (d) fáze 3 – členěná šachta s nehořlavým opláštěním (prostor nad přepážkou je součástí výpočetní oblasti pro možnost sledování přeskočení plamene)

3.5.3 Požárnětechnická charakteristika desek z PMMA

Polymethylmetakrylát (PMMA), někdy též označovaný jako akrylátové nebo organické sklo (plexisklo), je průhledný syntetický polymer s vlastnostmi termoplastu, který je obecně kvůli svým relativně dobře známým vlastnostem často využíván v požárnětechnickém výzkumu. Výroba je založena na polymeraci esteru methylnmethakrylátu (MMA) se sumárním (molekulovým) vzorcem $(C_5H_8O_2)_n$, jenž je rovněž jedním ze vstupních reakčních parametrů v CFD modelu. Technologie výroby a přísady se mohou mezi výrobci částečně lišit a s tím souvisí i určitý rozptyl v požárnětechnické charakteristice publikované v literatuře či v odborných diskusích na internetu.

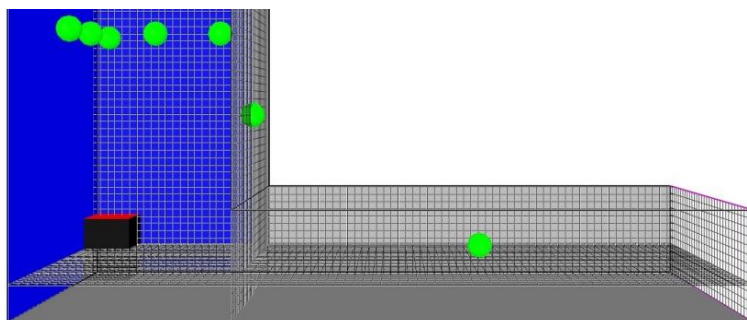
Z toho důvodu je PMMA použitý ve fázi experimentu 2 podroben individuální termo-gravimetrické analýze (TGA), jejímž úkolem je zjistit reakční parametry při zahřívání vzorku, které jsou klíčovými vstupními daty pro CFD model šachty. Otestováno je celkem 5 vzorků PMMA, které jsou zahřívány lineárně se zvyšující teplotou ($5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$). Sledován je při testu **úbytek hmotnosti** v čase a tzv. **reakční rychlost** termo-oxidační reakce vzorku a jí odpovídající tzv. **referenční rychlost a teplota**. Referenční teplota je nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím kinetiku hoření, avšak nejedná se o teplotu vzplanutí ani o teplotu hořícího povrchu. Přesněji řečeno se jedná v kontextu s TGA analýzou o teplotu, při které dochází k největší rychlosti úbytku hmotnosti. Podrobné výsledky z TGA s vyznačením sledovaných parametrů v grafu jsou uvedeny v Příloze 2, částečně pak v následující tabulce.

Tab. 3.3 Tepelně a požárnětechnické charakteristiky polymetylmakrylátu (PMMA) použité jako vstupní data pro CFD model šachty

Charakteristika PMMA	Hodnota	Zdroj
Součinitel tepelné vodivosti λ (W/m/K)	0,19	Technické listy výrobce KOPLAST spol. s r. o.
Měrná tepelná kapacita c (kJ/kg/K)	1,32	
Objemová hmotnost ρ (kg/m ³)	1 190	
Referenční teplota T_r ($^{\circ}\text{C}$)	305,69	TGA – viz Příloha 2
Referenční rychlost r_p (1/s)	0,0035607	
Výhřevnost H (kJ/kg)	25 000	(Tewarson, 2008)
Vydatnost sazí (kg/kg)	0,022	

3.5.4 Výpočetní síť

Prostorová výpočetní síť pokrývající šachtu a tunel pro přívod vzduchu je nadefinována pomocí krychlových kontrolních objemů (buněk) se základním modulovým rozměrem 25 mm. Jemnost sítě je v určitých variantách výpočtu zmenšena o 50 %, a to na rozměr buňky 12,5 mm, a o dalších 50 % na rozměr buňky 6,25 mm s cílem poskytnout informaci o vlivu na výpočet (přesnost, délka výpočtu apod.).



Obr. 3.13 Část výpočetní oblasti (dno šachty) pokryté sítí s kontrolními objemy o velikosti 12,5 mm (fáze 2 – varianta B)

Jemnost výpočetní sítě je možné stanovit na základě poměru charakteristického požárního průměru D^* a velikosti výpočetní buňky δ_x , který by se měl pohybovat v optimálním intervalu 4–16 (McGrattan, McDermott, Hostikka, & Floyd, 2007). Vyšší poměr znamená jemnější výpočetní síť, detailnější a přesnější výpočet, ale rovněž delší výpočetní čas. S výhodou lze využít výpočetní kalkulátor pro software FDS dostupný na webových stránkách

<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>, kde po zadání geometrie výpočetní oblasti a tepelného výkonu požáru je vypočtena jednak hodnota D^* a jednak navržena různá velikost výpočetní sítě (hrubá, průměrná a jemná síť).

Například pro fázi experimentu 1 (průběžná šachta) se sítí výpočetních buněk o rozměru 25 mm a tepelným výkonem hořáku 20 kW lze poměr D^*/δ_x stanovit následujícím výpočtem:

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}}\right)^{2/5}}{\delta_x} = \frac{\left(\frac{20}{1,204 \cdot 1,005 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,81}}\right)^{2/5}}{0,025} = \frac{0,201}{0,025} \approx 8,0 \quad (3.9)$$

kde: D^* – charakteristický průměr požáru (m)

$\dot{Q}$ – rychlost uvolňování tepla (kW), tj. výkon hořáku (20 nebo 6 kW)

$\rho_\infty = 1,204 \text{ kg/m}^3$ – hustota okolního vzduchu (za konstantního tlaku)

$c_p = 1,005 \text{ kJ/kg/K}$ – měrná tepelná kapacita vzduchu (za konstantního tlaku)

$T_\infty = 293 \text{ K}$ – teplota okolního vzduchu (cca 20 °C pro laboratorní prostředí)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – gravitační zrychlení

δ_x – velikost kontrolního objemu (m), tj. délka strany krychle v tomto případě

Obdobně pro fázi experimentu 2 (částečné hořlavé opláštění) se sítí výpočetních buněk o rozměru 6,25 mm a tepelným výkonem hořáku 6 kW je poměr D^*/δ_x následující:

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{\left(\frac{6}{1,204 \cdot 1,005 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,81}}\right)^{2/5}}{0,00625} = \frac{0,124}{0,00625} \approx 19,8 \quad (3.10)$$

Nejnáročnější je výpočet pro fázi experimentu 2, kde zpočátku vytváří primární zdroj požáru plynový hořák a dále se zvyšující intenzitou se přidává sekundární zdroj – postupně se rozhořívající povrch z PMMA. Po určité době experimentu je primární zdroj odstraněn, tj. vypnut plynový hořák. Modelování rozvoje či udržení hoření „na scéně“ definováním hořlavých materiálů patří mezi nejnáročnější simulace a svou klíčovou roli hraje právě jemnost sítě. Základní model sítě 25 mm je sice ve fázi experimentu 2 simulován, ale po odstranění primárního zdroje požáru dochází během několika sekund k samovolnému vyhasnutí plamene na povrchu PMMA. Situace se sítí 12,5 mm je podobná a výrazně se rozchází s provedeným experimentem. Teprve jemnost sítě 6,25 mm začíná být v simulaci schopna po delší časový úsek udržet plamen na povrchu desek z PMMA, nicméně délka výpočtu je i s využitím velice výkonného počítače značná (Tab. 3.4).

Pro časově náročné výpočty je možné a velice výhodné v programu FDS využít tzv. **paralelního zpracování dat**, ve kterých se na výpočtu podílí více procesorů současně, a to ať již v rámci jednoho počítače, nebo v rámci více počítačů propojených do sítě. FDS využívá systém MPI (Message Passing Interface), který přerozděluje každé dílčí části (síti nebo skupině sítí) ve výpočetní oblasti nadefinovaný počet procesorů a výpočet tak probíhá současně – paralelně. Každému procesoru je pak vhodné ponechat podobně velkou část výpočetní oblasti, jelikož v každém časovém kroku výpočtu nejrychlejší procesor vyčká, až je proveden výpočet na ostatních procesorech, a pak je teprve zahájen výpočet v navazujícím časovém kroku. Tento systém je v experimentu využit pro výpočty v síti 12,5 mm (fáze experimentu 1 a 3), kde je paralelně v jednom počítači v chodu 6 procesorů a pro výpočty v síti 6,25 mm (fáze experimentu 2) pak až 8 procesorů (Tab. 3.4).

Tab. 3.4 Účinnost různé velikosti výpočetní sítě pro jednotlivé fáze experimentu

Experiment	Velikost buněk v síti δ_x (mm)	Počet buněk	Poměr D^*/δ_x	Orientační doba výpočtu dle konfigurace počítače
Fáze 1	$25 \times 25 \times 25$	17 280	8,0	2,9 dne ¹⁾
	$12,5 \times 12,5 \times 12,5$	138 240	16,1	21,5 dne ³⁾
Fáze 2 – varianta A	$6,25 \times 6,25 \times 6,25$	1 105 920	19,8	17 dní ⁴⁾
	$12,5 \times 12,5 \times 12,5$	138 240	9,9	2,7 dne ⁴⁾
Fáze 2 – varianta B	$6,25 \times 6,25 \times 6,25$	1 105 920	19,8	39,3 dne ²⁾
Fáze 3	$25 \times 25 \times 25$	21 888	8,0	7,6 dne ¹⁾
	$12,5 \times 12,5 \times 12,5$	175 104	16,1	5 dní ¹⁾

Poznámky: konfigurace použitých počítačů

¹⁾ MS Windows XP, 32 bit, 1 procesor Intel(R) Pentium(R) D CPU 3,4 GHz, cache size 1 MB, operační paměť 2 GB RAM

²⁾ Linux, 64 bit, knihovna openmpi paralelizace – 8 procesorů se sdílenou pamětí – Intel(R) Xeon(R) CPU 2,27 GHz, cache size 8 MB, operační paměť 12 GB RAM

³⁾ Stejná konfigurace počítače jak v bodě 2) – výpočet na 6 procesorech

⁴⁾ Linux, 64 bit, knihovna openmpi paralelizace – 2 procesory Intel(R) Xeon(R) CPU 3,47 GHz, cache size 12 MB, operační paměť 48 GB RAM

3.5.5 Simulace hořáku, turbulence a radiace

Plynový propanový hořák je v programu FDS zadáván jako „množství uvolněného tepla na jednotku plochy“ v kW/m² (příkaz HRRPUA = Heat Release Rate Per Unit Area). Pro požadovaný tepelný výkon během experimentu (20 nebo 6 kW) je nutné v simulaci zohlednit hořící plochu hořáku a provést přepočítání jednotek (kW/m² – Tab. 3.5). Propan je definován sumárním vzorcem C₃H₈ a vydatností sazí 0,024 kg/kg (Tewarson, 2008).

Turbulence vzdušného proudu v šachtě jsou modelovány tzv. módem **LES** (Large Eddy Simulation), tj. defaultní simulací velkých vzdušných vírů v programu FDS.

Radiační podíl je důležitý parametr vyjadřující, jaká část z celkové uvolněné energie náleží tepelné radiaci. Ze základní rovnice radiace tepla (2.5) je zřejmé, že tato část energie závisí na teplotě plamene (ve čtvrté mocnině) a na charakteru (emisivitě) sálajícího povrchu. Ve výpočtech se síti s buňkami 10 mm a více v podstatě nelze přímo počítat teploty plamene, a definice radiačního podílu je tedy alternativní způsob výpočtu sdílení tepla radiací (McGrattan, McDermott, Hostikka, & Floyd, 2007). Pro model šachty je v programu FDS ponechána defaultní hodnota 0,35, tj. 35 % uvolněné energie náležející radiaci.

Tab. 3.5 Simulace tepelného výkonu hořáku

Experiment	Výkon hořáku (kW)	Půdorysný rozměr / výška (mm)	Hořící plocha (m ²)	HRRPUA (kW/m ²)
Fáze 1 a 3	20	100 × 200 / 100	0,02	1 000
Fáze 2	6	75 × 75 / 100	0,005625	1 067

Pro zvýšení přesnosti výpočtu přenosu tepla radiací je navýšen parametr vyjadřující počet radiačních směrů (paprsků) z defaultní hodnoty 100 na 300. Tato úprava sice částečně zvyšuje celkovou délku výpočtu, ale bývá v odborných diskusích uživatelů FDS doporučována.

Počáteční teplota pro vnitřní laboratorní prostředí je v simulaci uvažována 20 °C.

3.6 Porovnání výsledků laboratorního a matematického CFD modelu

Společným cílem všech 3 experimentálních fází je na jednu stranu ověřit míru shody výsledků získaných laboratorním měřením s výsledky získanými matematickou CFD simulací s využitím programu FDS. Na druhou stranu všechny 3 experimentální fáze mají své individuální technické odlišnosti.

Smyslem fáze experimentu 1 (průběžná šachta s nehořlavým opláštěním) je ověřit míru shody z hlediska bodového měření teplot, tepelného toku a rychlosti proudění od účinku řízeného požáru. V případě fáze experimentu 2 jde o ověření submodelu hoření predikujícího rozvoj požáru po náhradním požárním zatížení (desky z PMMA) po vypnutí plynového hořáku jako iniciačního zdroje požáru. Fáze experimentu 3 pak ověřuje chování kumulované vrstvy kouře v šachtě a potencionální riziko přeskočení plamene nad stropní přepážku.

Jak podrobněji popisuje předchozí Kapitola 3.3, v následujících grafech je v označení měřicích bodů využito zkratk, ve kterých na prvním místě figuruje písmeno označující typ měřicího zařízení („T“ = *termočlánek* pro měření teplot, „R“ = *radiometr* pro měření tepelného toku, „A“ = *anemometr* pro měření rychlosti proudění), následuje výšková úroveň, půdorysné umístění u termočláneků a zkratka „(lab)“ pro hodnotu měřenou v laboratoři nebo „(fds)“ pro hodnotu získanou matematickou CFD simulací v softwaru FDS. V případě simulované veličiny je uváděna velikost buňky ve výpočetní síti, tj. velikost strany krychle (25, 12,5 nebo 6,25 mm). V některých grafech zejména s průběhy teplot a rychlostí proudění v oblasti nad hořákem jsou patrné velké fluktuace v čase. Průběhy jsou pro snazší orientaci doplněny o tzv. *klouzavý průměr* v programu Microsoft Excel a tato informace je uváděna v legendách jednotlivých grafů.

3.6.1 Porovnání výsledků pro průběžnou šachtu s nehořlavým opláštěním (Fáze 1)

Pro fázi experimentu 1 jsou vzájemně porovnávány:

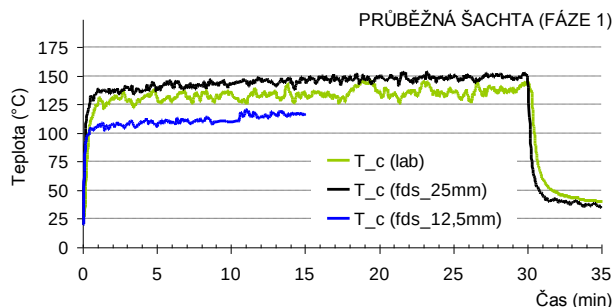
- *teploty z 12 měřicích bodů* umístěných v šachtě nad hořákem (termočláanky T_a_1 až 5, T_b_1 až 5 a T_c) a v tunelu pro přívod vzduchu (termočlánek T_tunel); termočlánek v tunelu je osazen pouze pro účely získání teploty přiváděného vzduchu (okolní teplota);
- *celkový dopadající tepelný tok z 2 měřicích bodů* umístěných nad sebou v ose zadní šachtové stěny (radiometry R_1 a R_2);
- *rychlost proudění vzduchu z 2 měřicích bodů* (anemometry A_c a A_tunel).

3.6.1.1 Porovnání teplot

Výšková úroveň „c“ (1,9 m nad dnem šachty)

Jak teploty měřené, tak simulované mají na výškové úrovni „c“ (Obr. 3.14) výrazně menší flukтуаční charakter, než je tomu u termočláneků blíže k hořáku. Laboratorně jsou měřeny teploty okolo 130 °C. V porovnání s laboratorním modelem predikuje CFD model s výpočetní sítí 25 mm lehce vyšší teploty (okolo 145 °C), zatímco s výpočetní sítí 12,5 mm predikuje teploty naopak nižší (okolo 110 °C) a má viditelně méně flukтуаční průběh v čase. Uvážíme-li

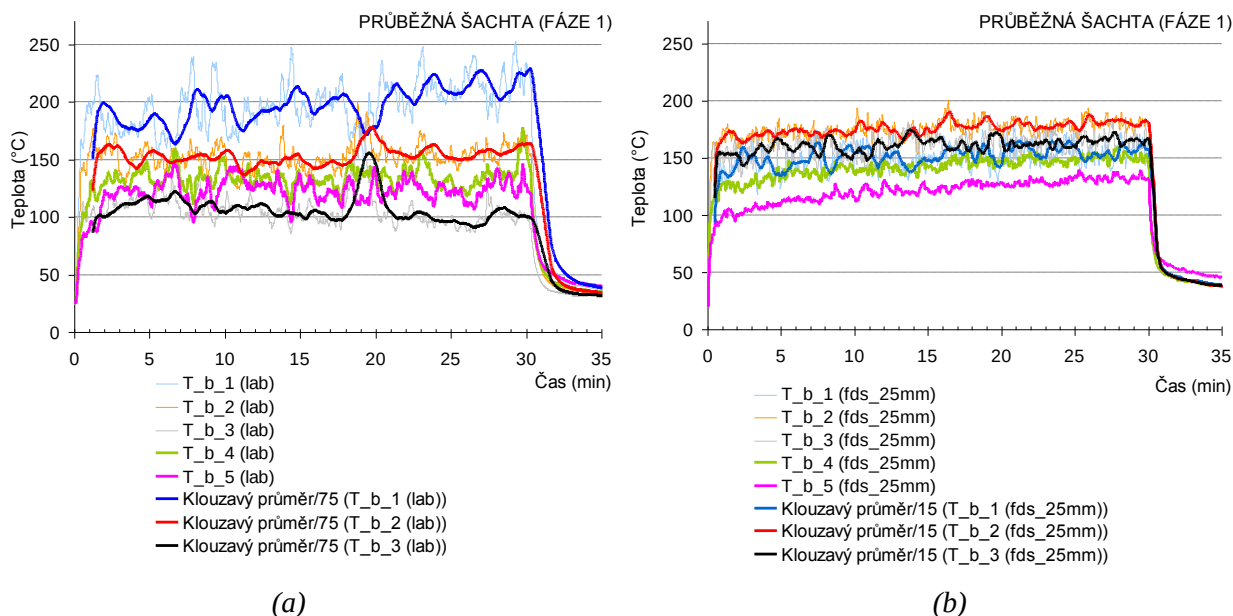
dynamické chování účinku požáru v takto těsném a uzavřeném prostoru, jde o velice dobrou shodu výsledků.



Obr. 3.14 Porovnání teplot na výškové úrovni „c“ mezi laboratorním měřením (lab) a CFD simulací (fds) v program FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm

Výšková úroveň „b“ (1,15 m nad dnem šachty) a „a“ (0,4 m nad dnem šachty)

Z průběhu laboratorně měřených teplot na výškové úrovni „b“ (Obr. 3.15 (a)) je zajímavý náklon teplotního pole k levé boční šachtové stěně směrem na termočlánek 1, který pak ukazuje vyšší teplotu (cca 200 °C) než termočlánek 2 umístěný přímo nad hořákem (cca 150 °C). Naopak termočlánek 3 u pravé boční stěny ukazuje teplotu přibližně poloviční (cca 100 °C) v porovnání s termočlánekem 1 u stěny levé. Důvodem pro náklon teplotního pole je náklon vlastního plamene v šachtě, který může být ovlivněn nedokonalou rozptylovou schopností hořáku nebo pravděpodobněji bezpečnostními zástěnami kolem laboratorního modelu šachty ovlivňujícími přívod vzduchu (Obr. 3.10 (a)) do šachty. Obdobný náklon teplotního pole je patrný i na výškové úrovni „a“, což vylučuje systematickou chybu v měření.

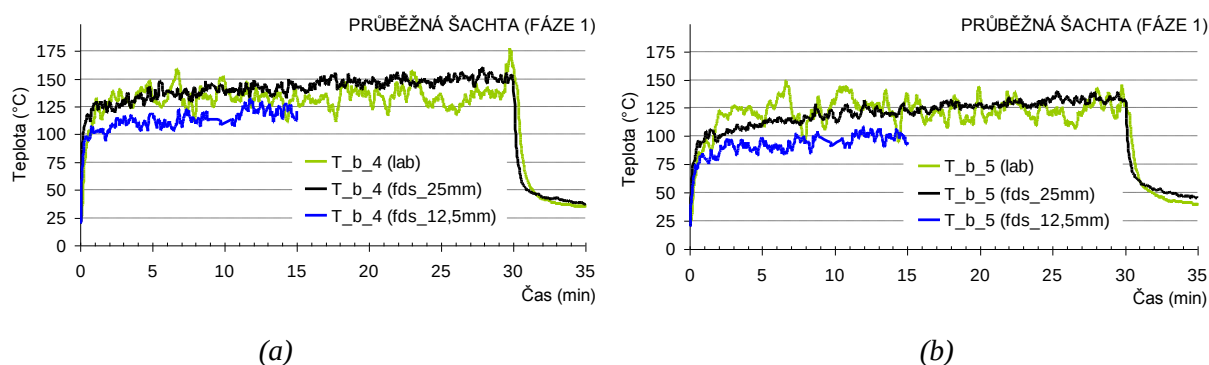


Obr. 3.15 Teploty na výškové úrovni „b“: (a) laboratorní měření (lab); (b) CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 mm

V rámci CFD modelu nejsou simulovány okolní laboratorní zástěny kolem šachty, a tudíž ani vliv přívodu vzduchu na náklon teplotního pole není možné ověřit. Zajímavostí však je, že i CFD model nepredikuje pro v šachtě symetricky umístěné termočláanky 1 a 3 zcela symetrický průběh

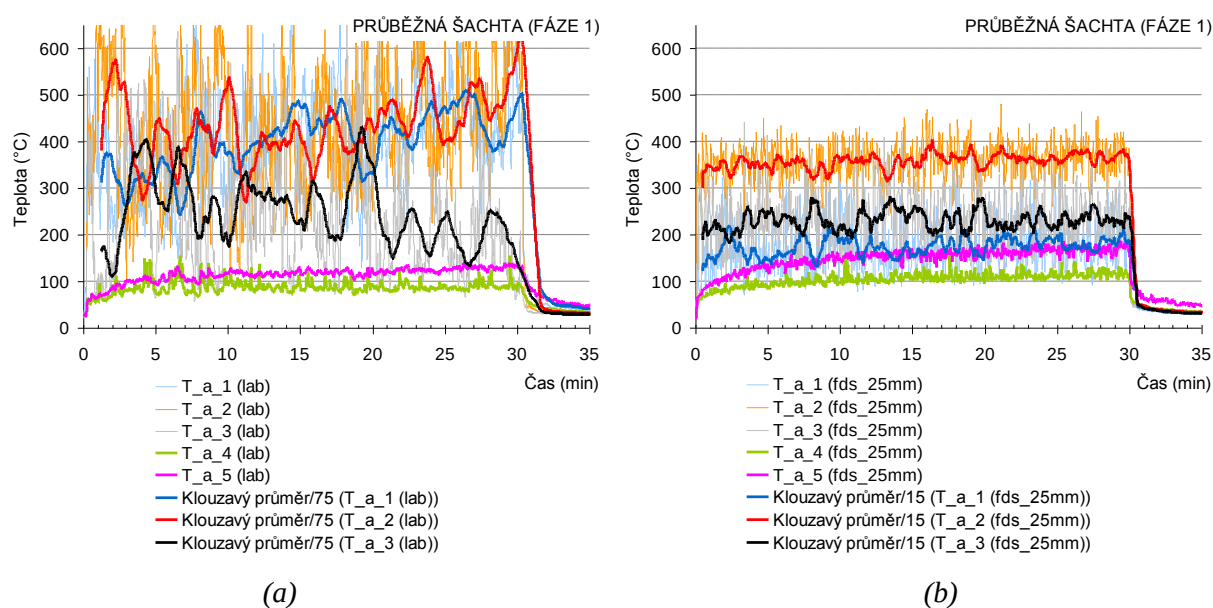
teplot, jak by se dalo očekávat, ale jak na výškové úrovni „b“ (Obr. 3.15 (b)), tak na úrovni „a“ (Obr. 3.17 (b)) jsou měřeny lehce vyšší teploty u jedné boční stěny než u druhé. Teploty laboratorně měřené termočlánky 1, 2 a 3 (tj. nad hořákem podél přední stěny) mají výrazný flukтуаční průběh v čase, zejména pak na výškové úrovni „a“. Tento fakt ovlivňuje jednak měření v oblasti přímo nad plameny, kde je největší dynamický účinek konvektivního sloupce (tzv. oblast „fire plume“), a jednak malý průměr termočlánků s vysokou citlivostí a rychlostí tepelné odezvy (průměr 0,5 mm na výškové úrovni „a“). CFD model predikuje teplotní průběh s výrazně menšími teplotními výkyvy.

Na výškové úrovni „b“ laboratorní termočlánky 1, 2 a 3 udávají teplotu v rozmezí cca 100–220 °C, zatímco CFD model udává teplotní rozmezí výrazně menší, tj. cca 140–170 °C.



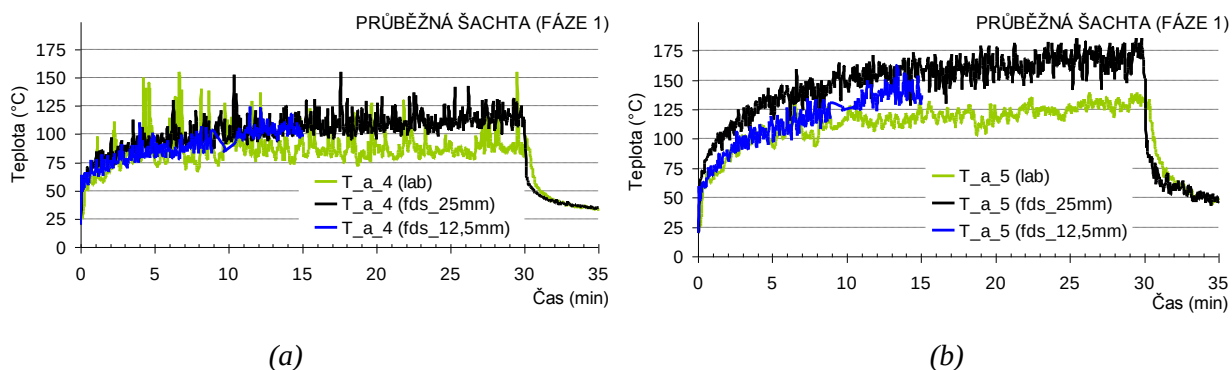
Obr. 3.16 Teploty na výškové úrovni „b“ – porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm: (a) poloha T_{b_4} ; (b) poloha T_{b_5}

Teploty uprostřed šachty (termočlánek 4) a u zadní šachtové stěny (termočlánek 5) mají menší výkyvy v čase a není je tak nutné nahrazovat funkcí klouzavého průměru. Laboratorní a simulované teploty jsou pak i snáze porovnatelné a na výškové úrovni „b“ (Obr. 3.16) je patrná jejich velice dobrá shoda. Obdobně jako na výškové úrovni „c“, i zde jemnější výpočetní síť s buňkami 12,5 mm predikuje celkově nižší teploty ve srovnání s hrubší sítí s buňkami 25 mm.



Obr. 3.17 Teploty na výškové úrovni „a“: (a) laboratorní měření (lab); (b) CFD simulace v programu FDS s výpočetní sítí 25 mm

Na výškové úrovni „a“ jsou u termočlánků 1, 2 a 3 výrazné teplotní fluktuace, a to zejména u laboratorního modelu, ale částečně i u CFD modelu (Obr. 3.17), a při vzájemném porovnání s tím souvisí i největší rozdíly. Laboratorní teploty se pohybují v rozmezí cca 150–600 °C, zatímco simulované teploty ve výrazně užším rozmezí 200–400 °C. Jsou-li porovnány na výškové úrovni „a“ opět teploty uprostřed šachty (termočlánek 4) a u zadní šachtové stěny (termočlánek 5), je patrná výborná shoda mezi laboratorním a CFD modelem, a to zejména pro jemnější výpočetní síť s buňkami 12,5 mm.

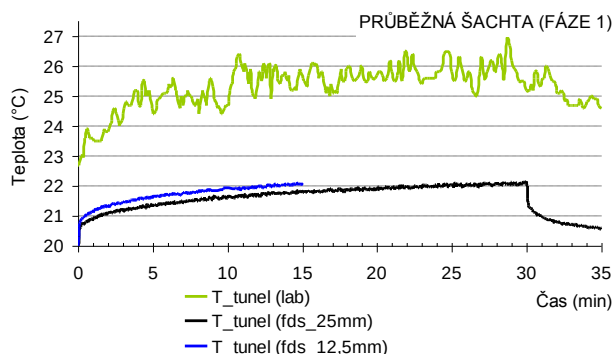


Obr. 3.18 Teploty na výškové úrovni „a“ – porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm: (a) poloha T_{a_4}; (b) poloha T_{a_5}

Další zajímavostí jsou vyšší teploty u zadní šachtové stěny (termočlánek 5) v porovnání s teplotou uprostřed šachty (termočlánek 4). Tento jev postihuje jak laboratorní, tak CFD model a je způsobený absorpcí a akumulací dopadajícího tepelného toku od plamenů do zadní šachtové stěny z plynosilikátu, díky níž roste teplota stěny. Následně je pak částečně tepelná energie emitována či odražena zpět do prostoru šachty, což se projevuje vyšší teplotou v blízkosti zadní stěny.

Výšková úroveň „tunel“ (0,075 m nad dnem šachty)

Teplota na výškové úrovni „tunel“ je sledována uprostřed tunelu pro přívod vzduchu. Laboratorní měření a CFD simulaci nelze přímo porovnávat, jelikož se v tomto místě projeví rozdílné okrajové podmínky v počáteční teplotě. Při laboratorním měření je počáteční teplota v laboratoři cca 23 °C (teplota v čase 0, Obr. 3.19), v rámci simulace je zadána počáteční teplota 20 °C. Uvážíme-li dynamické změny teplot v podmínkách požáru, nemá tento teplotní rozdíl (cca 3 °C) žádný vliv na přesnost simulace.

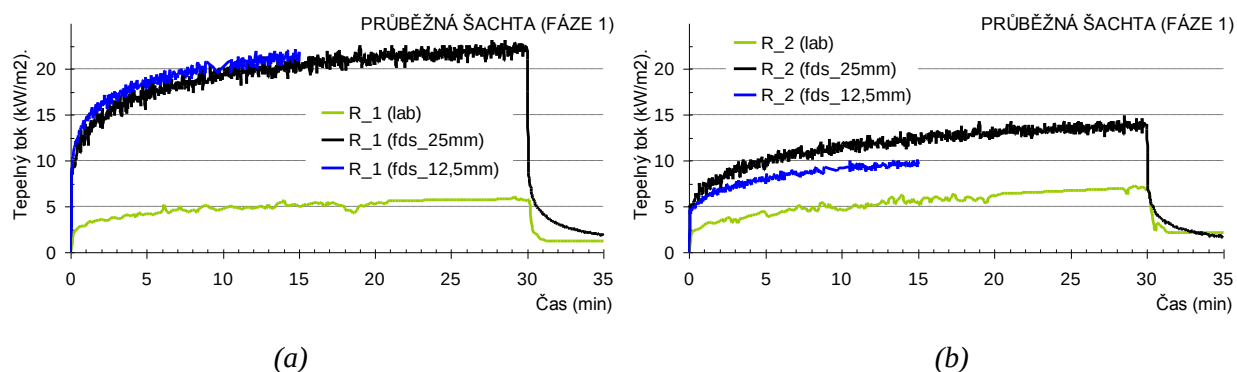


Obr. 3.19 Porovnání teplot na výškové úrovni „tunel“ mezi laboratorním měřením (lab) a CFD simulací (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm

Z porovnání laboratorního měření a CFD simulace však můžeme hodnotit vliv radiace tepla a ohřívání opláštění šachty, které se projeví ve zvyšující se teplotě přiváděného vzduchu v přívodním tunelu (Obr. 3.19). Při laboratorním měření dojde v průběhu experimentu k nárůstu teploty o cca 3 °C (z 23 na 26 °C), u CFD simulace se síť 25 mm o cca 2 °C (z 20 na 22 °C), a jde tudíž o dobrou shodu trendu.

3.6.1.2 Porovnání tepelného toku

Celkový tepelný tok dopadající na zadní šachtovou stěnu (tj. radiální a konvekční složka z celkového uvolněného tepla z hořáku) je sledován radiometry umístěnými na svislé ose zadní šachtové stěny ve dvou bodech, a to ve výšce 0,275 a 0,525 m nad dnem šachty (Obr. 3.1 (b) a Obr. 3.5).



Obr. 3.20 Tepelný tok – porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm: (a) poloha R_1; (b) poloha R_2

Dolní radiometr R_1 je umístěný blíže k hořáku, avšak v rámci laboratorního měření ukazuje velice podobné hodnoty jako horní radiometr R_2. Průběh tepelného toku v čase má mírně rostoucí charakter pohybující se v rozmezí cca 3–7 kW/m² (Obr. 3.20).

Naopak u CFD simulace se predikované hodnoty pro dolní a horní radiometr výrazně liší, a to až dvojnásobně (Obr. 3.20). Jemnější výpočetní síť (12,5 mm) má oproti hrubší síti (25 mm) minimální vliv u dolního radiometru R_1, u horního radiometru pak jemnější síť predikuje nižší hodnoty tepelného toku, podobně jako je tomu u simulací teplot. Další odlišností oproti laboratornímu měření je výrazný logaritmicky rostoucí průběh simulovaného tepelného toku v čase, kde například pro dolní radiometr R_1 počáteční hodnota tepelného toku cca 10 kW/m² vzroste v průběhu 30 minut simulace na cca 22 kW/m², u horního radiometru R_2 během pak stejné doby z hodnoty cca 5 na cca 14 kW/m².

Tab. 3.6 Tepelný tok – porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace v 15. minutě

Tepelný tok (kW/m ²) v 15. minutě		Pozice radiometru	
		R_1	R_2
Laboratorní měření (lab)		5	6
CFD simulace (fds)	síť 12,5 mm	21	10
	síť 25 mm	20	12,5

Při vzájemném porovnání laboratorního měření a CFD simulace jsou patrné výrazné rozdíly (Obr. 3.20), a to zejména pro dolní radiometr R_1. Například v polovině délky experimentu (15. minuta) radiometr R_1 udává laboratorní hodnotu cca 5 kW/m², zatímco při CFD simulaci je tato

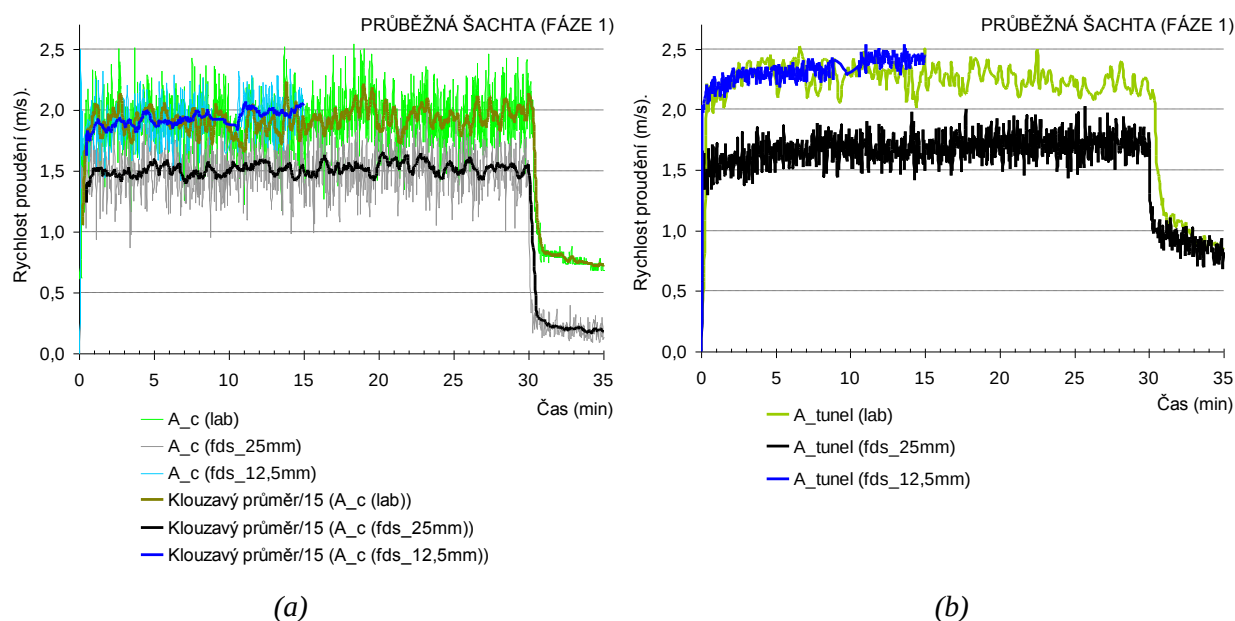
hodnota predikována $4\times$ vyšší (Tab. 3.6). U radiometru R_2 je tento trend podobný, ale rozdíly nejsou tak markantní a simulované hodnoty jsou přibližně dvojnásobné.

Rozdíly mezi laboratorním měřením a CFD simulací jsou natolik velké, že byla zpětně hledána případná chyba v měření v požárnětechnické laboratoři CSI a.s. Vzhledem ke skutečnosti, že oba radiometry byly pro experiment použity úplně poprvé a byly kalibrovány přímo výrobcem, byla chyba hledána v dalším článku systému, a to ve „starším“ liniovém zapisovači (Obr. 3.7). Zapisovač měl v době experimentu platnou kalibraci, ale přesto byla jeho funkčnost dodatečně ověřena. Na zapisovač byl připojen termočlánek sledující teplotu v malé elektrické píce, která je využívána v laboratořích CSI a.s. pro zkoušku nehořlavosti stavebních výrobků a udržuje stálou vnitřní teplotu. Ten samý termočlánek byl napojen i na měřicí ústřednu použitou v experimentu (Obr. 3.6). Liniový zapisovač zaznamenal teplotu cca $714\text{ }^{\circ}\text{C}$, měřicí ústředna pak teplotu cca $725\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato velmi dobrá shoda vyloučila možnost technické závady na liniovém zapisovači.

3.6.1.3 Porovnání rychlosti proudění vzduchu

Rychlost proudění je sledována ve dvou měřicích bodech, a to rychlostní sondou (anemometrem) A_c v horní části šachty nad hořákem na výškové úrovni „c“ (1,9 m nad dnem) a anemometrem A_tunel uprostřed tunelu pro přívod vzduchu (Obr. 3.5).

V oblasti nad hořákem obecně se dá očekávat proměnlivá rychlost proudění vzduchu, což potvrzuje na výškové úrovni „c“ jak laboratorní měření, tak CFD simulace, a v obou případech je pro možnost vzájemného porovnání v grafu využit klouzavý průměr. V přívodním tunelu má naopak proud vzduchu méně flukтуаční charakter (Obr. 3.21). Na rozdíl od tepelného toku nemá průběh rychlosti proudění vzduchu rostoucí charakter.



Obr. 3.21 Rychlost proudění vzduchu – porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm:
(a) výšková úroveň „c“; (b) přívodní tunel

Rychlost proudění vzduchu měřená v horní části šachty se pohybuje okolo 2 m/s, v přívodním tunelu pak okolo 2,3 m/s. CFD simulace s výpočetní sítí 25 mm predikuje v horní části rychlost cca 1,5 m/s, v tunelu pak cca 1,7 m/s, tj. v obou případech jsou simulované hodnoty přibližně

o 25 % nižší oproti laboratornímu měření. Naopak simulace rychlosti proudění v jemnější výpočetní síti 12,5 mm má velice dobrou shodu s laboratorním měřením, a to jak v šachtě, tak tunelu.

3.6.1.4 Závěr (Fáze 1)

Pro fázi experimentu 1 (průběžná šachta s nehořlavým opláštěním) lze na základě porovnání laboratorního a CFD modelu (simulace v programu FDS6) konstatovat následující závěry:

- **Porovnání teplot**

Docílená je velice dobrá shoda pro měřicí body mimo oblast sloupce horkých plynů nad hořákem. Oblast u přední šachtové stěny nad hořákem, zejména pak ve spodní polovině šachty, má dle předpokladu výrazné turbulentní chování, teploty mají tudíž značně flukтуаční charakter a porovnání je velmi problematické. Simulace s výpočetní sítí 25 mm má tendenci predikovat lehce vyšší teploty v porovnání s laboratorním měřením. Zjemněná síť 12,5 mm již nepřináší efekt v podobě zpřesnění výpočtu. Největší rozdíly se mezi laboratorním měřením a CFD simulací pohybují do 20 %.

- **Porovnání tepelného toku**

Shledána je výrazná neshoda pro oba radiometry sledující radiační a konvekční složku dopadajícího tepelného toku od hořáku. Laboratorně měřené hodnoty jsou 2–4× nižší než hodnoty simulované. Podobně velké rozdíly u tepelného toku (až o 50 % vyšší simulované hodnoty) jsou pozorovány i při prvním šachtovém experimentu provedeném v rámci zahraniční stáže a publikovány (Pokorný, Husted, & Kraaijeveld, 2011).

- **Rychlosti proudění**

Docílena je výborná shoda pro výpočetní síť 12,5 mm v obou měřicích bodech. Výpočetní síť 25 mm predikuje o cca 25 % nižší rychlosti proudění vzduchu.

3.6.2 Porovnání výsledků pro průběžnou šachtu s částečným hořlavým opláštěním (Fáze 2)

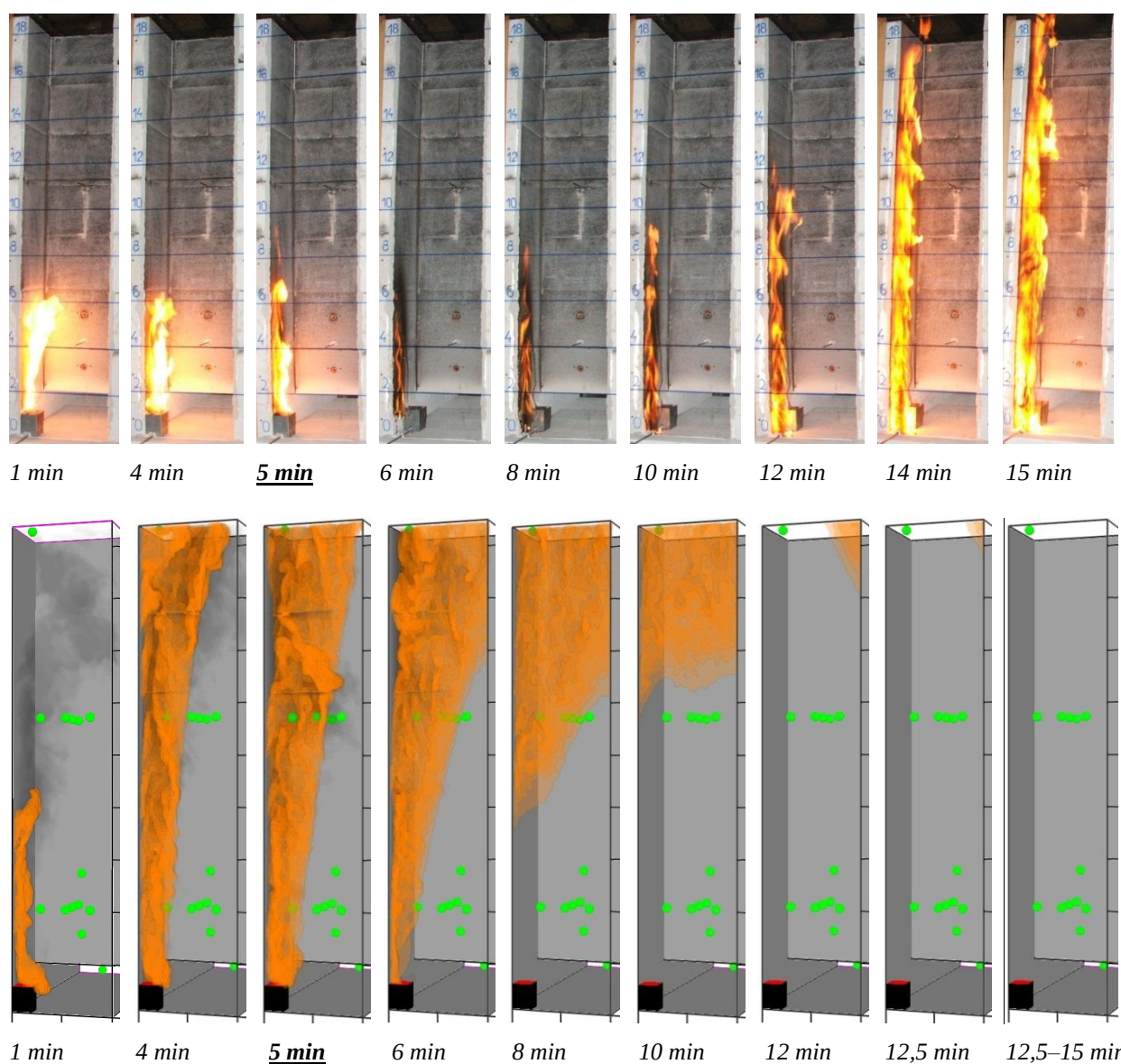
Plamen je velice rychle a dynamicky měnící se jev, jehož matematické ztvárnění (submodel hoření) je jedním z nejnáročnějších úkolů nejen v rámci CFD simulací. Situace je o to náročnější, pokud jsou definovány požárnětechnické charakteristiky použitých materiálů a simulován je samovolný rozvoj požáru a šíření plamene po povrchu hořlavých materiálů.

Ve fázi experimentu 1 (průběžná šachta s nehořlavým opláštěním) je jediným tepelným zdrojem plynový propanový hořák s konstantním tepelným výkonem (20 kW) během celé délky experimentu a nehořlavé opláštění šachty žádným způsobem nepřispívá k rozvoji požáru. Naopak smyslem fáze experimentu 2 je využít hořák s menším tepelným výkonem (6 kW) po určitou dobu jen jako primární iniciační zdroj zapálení, poté hořák vypnout a ponechat jako sekundární zdroj požáru částečné hořlavé opláštění šachty z desek z PMMA reprezentující požární zatížení, které se v instalačních šachtách běžně nachází. Ve variantě A je deska z PMMA osazena místo přední šachtové stěny a hořák vypnut v 5. minutě. Ve variantě B je další deska z PMMA připevněna na boční stěnu šachty, hořák vypnut ve 3. minutě a předpokládán výrazně dramatičtější a rychlejší rozvoj plamene ve vnitřním rohu šachty po povrchu desek.

Hlavní otázkou ve fázi experimentu 2 je, zda vytvořený matematický CFD submodel hoření je jednak schopný zapálit hořlavou přední stěnu šachty, ale především udržet a šířit plamen na jejím povrchu po vypnutí hořáku a dále jak intenzivně se projeví rohový účinek vnitřního požáru, bude-li jedna nebo obě šachtové stěny z hořlavého materiálu.

3.6.2.1 Hořlavá přední stěna (Fáze 2 – varianta A)

Na fotografiích laboratorního modelu jsou na přední stěně z PMMA vodorovně vyznačeny linie v rozestupu 2 dm (20 cm) pro možnost sledování vertikálního šíření plamene a stejné rozestupy jsou po pravé straně patrné i u CFD modelu na vizualizačních snímcích (Obr. 3.22). Na fotografiích a simulačních snímcích je možné si vytvořit vizuální představu o rozdílech mezi laboratorním a CFD modelem v časovém kroku 2 minuty, číselnou představu pak z následujícího grafu v časovém kroku 1 minuta (Obr. 3.23 (a)).



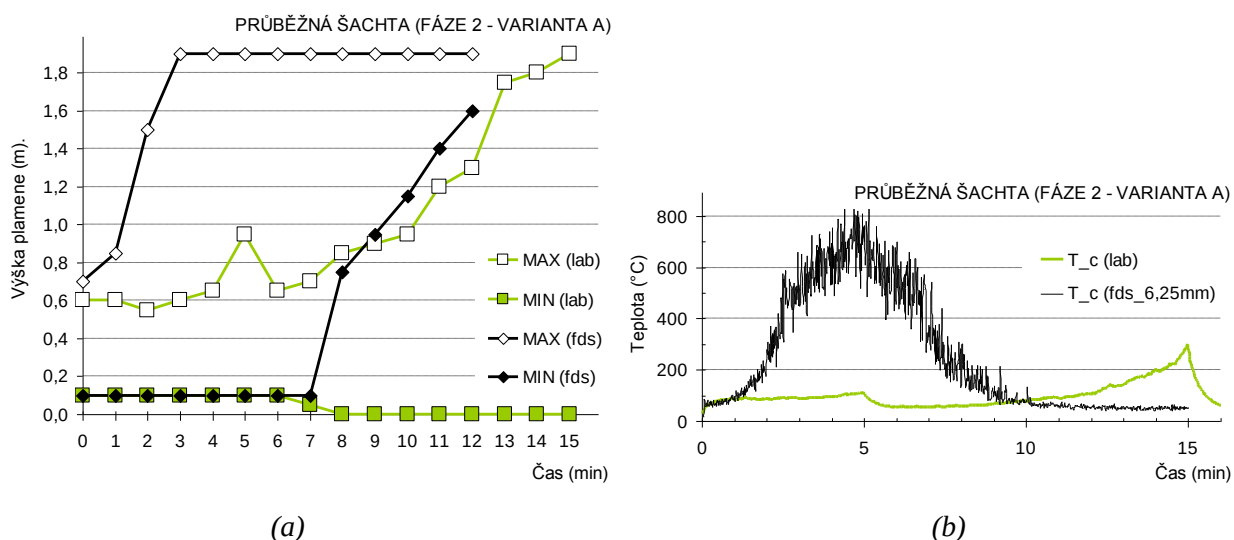
Obr. 3.22 Rychlost šíření plamene po povrchu přední stěny z PMMA; vypnutí hořáku v čase 5 min – dále již hoří pouze PMMA; horní fotografie z laboratorního experimentu; dolní vizualizační snímky z CFD simulace (výpočet v programu FDS s výpočetní sítí 6,25 mm; vizualizace v programu SMV)

Tato fáze experimentu je simulována i s výpočetní sítí 25 mm a 12,5 mm, tj. jako u experimentu s nehořlavým opláštěním (fáze 1 a 3). V obou simulacích je však zásadní problém, že není co porovnávat s laboratorním modelem, jelikož dochází ve velice krátké době (cca 40 s) po vypnutí hořáku k vyhasnutí plamene. Teprve po dalším zjemnění sítě na poloviční rozměr výpočetní buňky (6,25 mm) je schopen CFD model po vypnutí hořáku zapálit povrch čelní stěny a udržet déle plamen na jejím povrchu, avšak délka výpočtu se začíná enormně prodlužovat, a to i s využitím v dnešní době nadprůměrně výkonné výpočetní stanice (Tab. 3.4).

Již v 1. minutě je na hořáku patrná výrazně nižší výška laboratorního plamene (cca 0,6 m) v porovnání se simulovanou výškou plamene (cca 0,85 m) a tento rozdíl dále dramaticky roste s časem. Laboratorní plamen do 5. minuty jen nepatrně zvětší svou výšku, zatímco simulovaný plamen již těsně po 2. minutě dosahuje horního okraje přední stěny.

V okamžiku vypnutí hořáku (5. minuta) se u laboratorního modelu výrazně sníží výška plamene, avšak s postupným rozhoříváním se začíná opět zvětšovat. Před ukončením laboratorního experimentu hoří souvisle čelní stěna po celé své výšce (1,9 m) a přibližně v šířce 10–15 cm. Vypnutí hořáku v CFD modelu se ve vizualizaci téměř neprojeví, jelikož v tomto okamžiku již velice intenzivně hoří přední stěna po celé své výšce a v proměnlivé šířce korespondující s úhlopříčkou přední stěny. CFD model s výpočetní sítí 6,25 mm na rozdíl od sítě 25 a 12,5 mm je sice schopen udržet plamen na povrchu přední stěny po výrazně delší dobu po vypnutí hořáku, avšak od cca 7. minuty plamen odspodu postupně vyhasíná a od 12,5. minuty plamen mizí ze scény úplně.

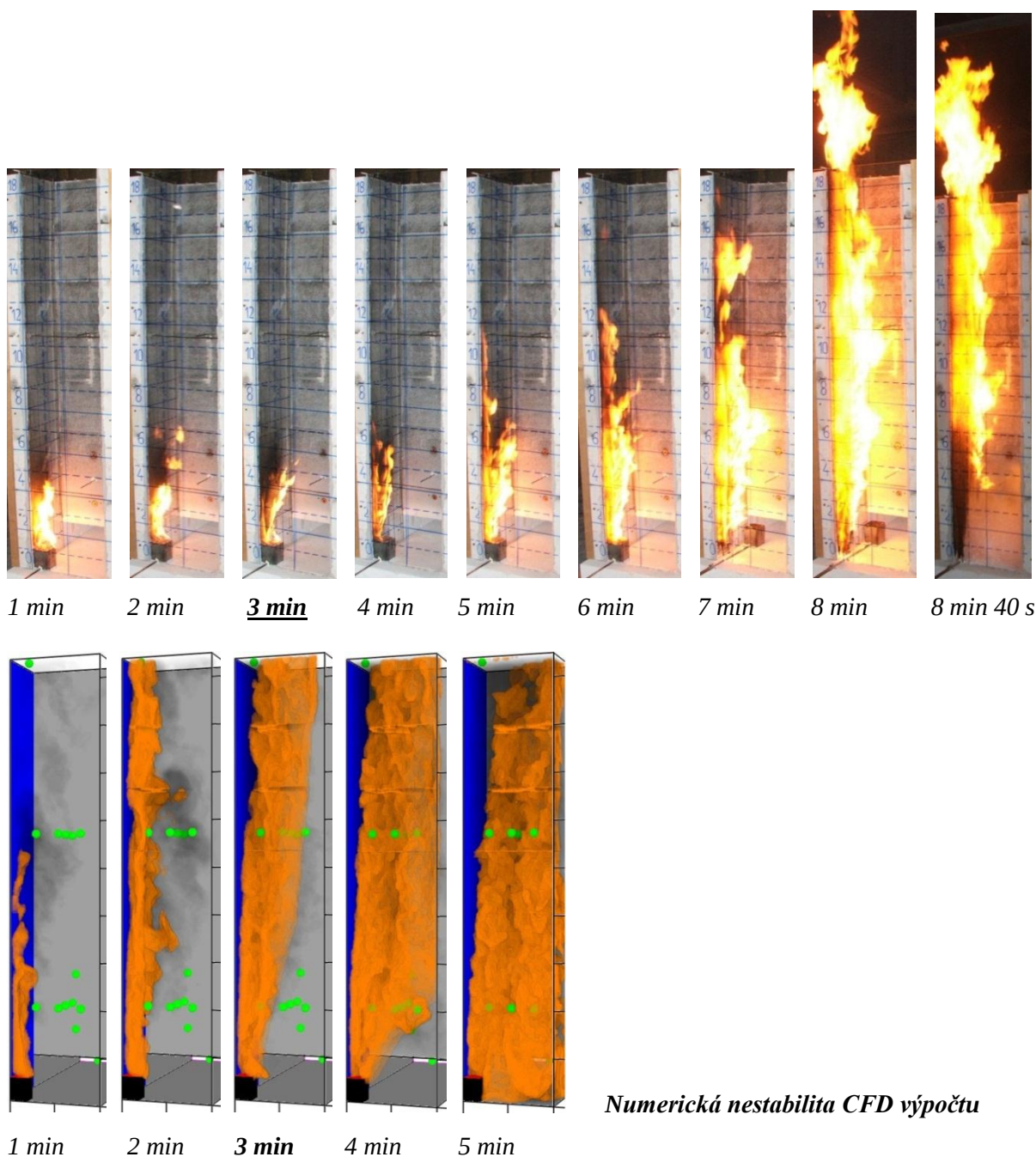
V porovnání s laboratorním modelem predikuje CFD submodel hoření jednak větší výšku plamene a jednak výrazně rychlejší vertikální šíření plamene po povrchu čelní stěny. Naopak po odstranění řízeného zdroje požáru (hořáku) se intenzita simulovaného plamene rychle snižuje. Tato odlišnost je patrná i při porovnání teplot na výškové úrovni „c“ (termočlánek umístěný nad hořákem; Obr. 3.5), kde nejprve výrazně dominují simulované teploty a teprve od cca 10. minuty teploty laboratorní.



Obr. 3.23 Porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 6,25 mm: (a) vertikální rychlost šíření plamene po povrchu přední stěny z PMMA; v grafu orientačně zaznamenána spodní (MIN) a horní (MAX) hranice plamene; (b) porovnání teploty na výškové úrovni „c“

3.6.2.2 Hořlavá přední a boční stěna (Fáze 2 – varianta B)

Stejně jako u varianty A jsou ve variantě B na laboratorním a CFD modelu vyznačeny na přední a boční stěně vodorovné linie v rozstupu 2 dm (20 cm) pro možnost sledování vertikálního šíření plamene. U laboratorního modelu jsou navíc u obou stěn doplněny čárkované mezilehlé linie a svislá středová linie pro jemnější rozlišení polohy plamene. Na fotografiích a simulačních snímcích (Obr. 3.24) je možné si vytvořit vizuální představu o výrazných rozdílech mezi laboratorním a CFD modelem v časovém kroku 1 minuta, číselnou představu pak z následujícího grafu v časovém kroku 0,5 minuty (Obr. 3.26).

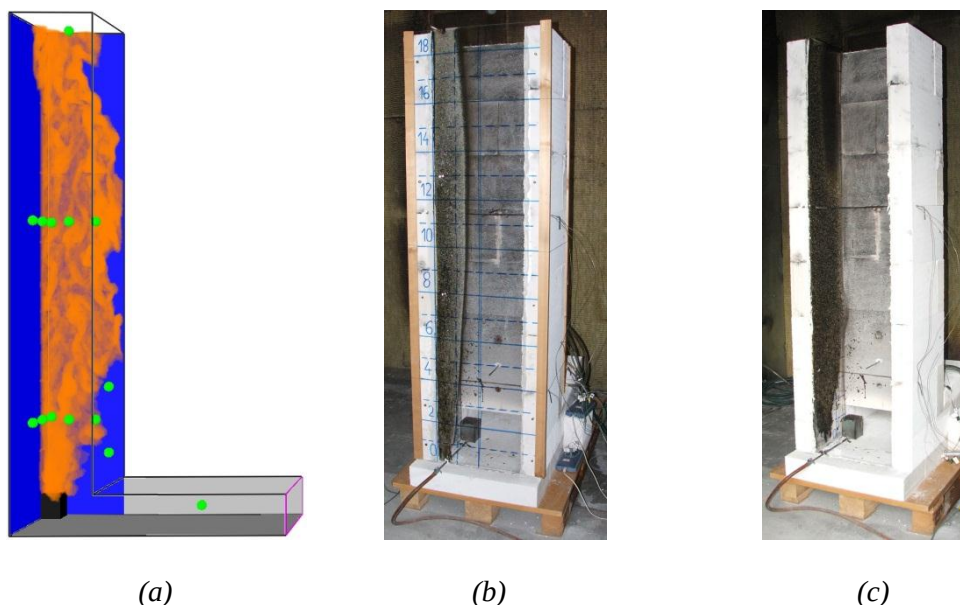


Obr. 3.24 Rychlost šíření plamene po povrchu přední a boční stěny z PMMA; vypnutí hořáku v 3. minutě – dále již hoří pouze PMMA; horní fotografie z laboratorního experimentu; dolní vizualizační snímky z CFD simulace (výpočet v programu FDS s výpočetní sítí 6,25 mm; vizualizace v programu SMV)

Po zkušenosti se simulací rozvoje po přední stěně (varianta A) není ve variantě B vůbec simulována výpočetní síť 25 mm, ale pouze síť 12,5 a 6,25 mm. Po vypnutí hořáku (3. minuta) dochází u sítě 12,5 mm stejně jako u varianty A k rychlému vyhasnutí simulovaného plamene (po cca 40 s). Teprve při dalším zjemnění sítě na 6,25 mm plamen na povrchu hořlavých desek z PMMA zůstává na scéně (Obr. 3.27), avšak délka výpočetního času je enormní a výpočet se dostává do opačného extrému, tj. do rychlého a intenzivního rozvoje požáru. Pokud není dále uváděno jinak, porovnávána je právě jemnější síť 6,25 mm.

Počáteční fáze vertikálního rozvoje požáru jsou podobné jako u varianty A, tj. nižší počáteční výška laboratorního plamene ve srovnání s výškou simulovanou a dramatický růst tohoto výškového rozdílu s časem (Obr. 3.24). Od počátku testu do okamžiku vypnutí hořáku (3. minuta) se počáteční výška laboratorního plamene (cca 0,5 m) téměř nemění, zatímco simulovaný plamen již těsně po 2. minutě dosahuje horního okraje přední stěny. ***V porovnání s laboratorním experimentem predikuje CFD model výrazně rychlejší a intenzivnější rozvoj požáru v šachtě.***

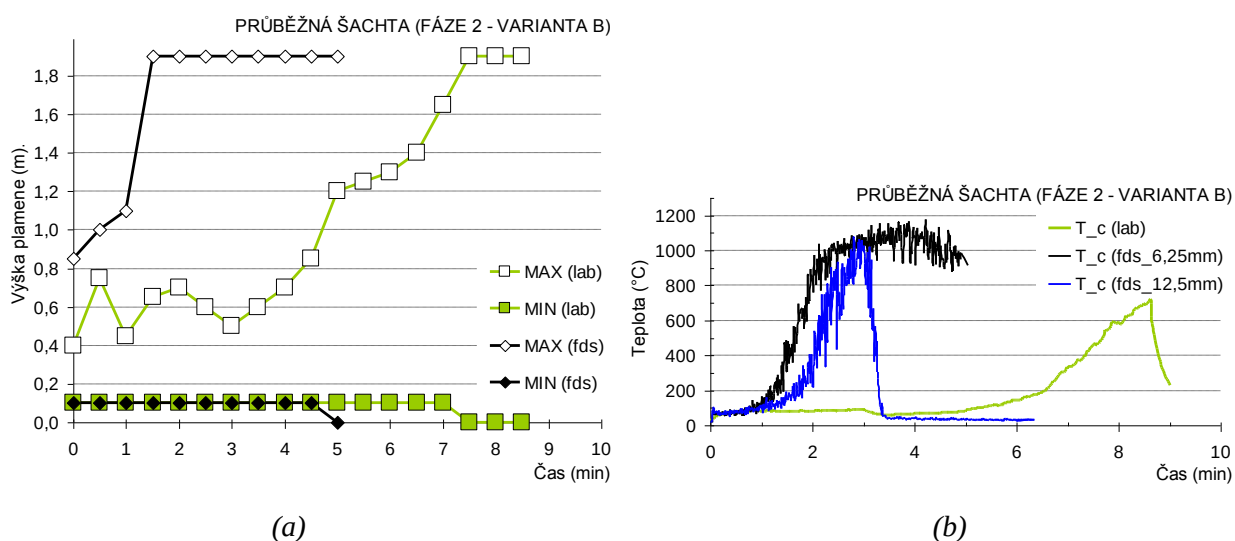
Numerický výpočet je pro tuto variantu natolik časově náročný, že během 1 dne dochází k časovému posunu v simulaci pouze o necelých 10 vteřin, a to i s využitím všech 8 procesorů na výpočetní stanici (Tab. 3.4). Přibližně v 5. minutě průběžně dochází v simulaci několikrát k přerušení výpočtu, tj. v čase, kdy v simulaci hoří celá plocha přední i boční stěny a množství uvolněného tepla nabývá maximálních hodnot (až 350 kW). Výpočet se sice vždy daří restartovat v čase 4,5 minuty s minimální ztrátou dat, ale následně je opět přerušen s kritickým hlášením numerické nestability výpočtu. Důvodem pro neudržitelnost výpočtu jsou vysoké hodnoty uvolněného tepla a velice jemná výpočetní síť ($\delta_x = 6,25 \text{ mm}$). Jsou-li dosazeny tyto hodnoty do rovnice (3.9), vychází poměr $D^*/\delta_x \approx 101$, což je hodnota výrazně mimo doporučený interval 4–16. To vede k velice dlouhému výpočtu časového kroku v simulaci a program FDS situaci vyhodnocuje jako numericky nestabilní.



Obr. 3.25 Vyšší míra poškození boční stěny z PMMA: (a) vizualizační snímek z CFD simulace (cca 2. minuta) – v počáteční fázi simulace hoří především boční stěna z PMMA; (b) částečné poškození přední stěny v šířce cca 10–15 cm; (c) téměř kompletní poškození boční stěny

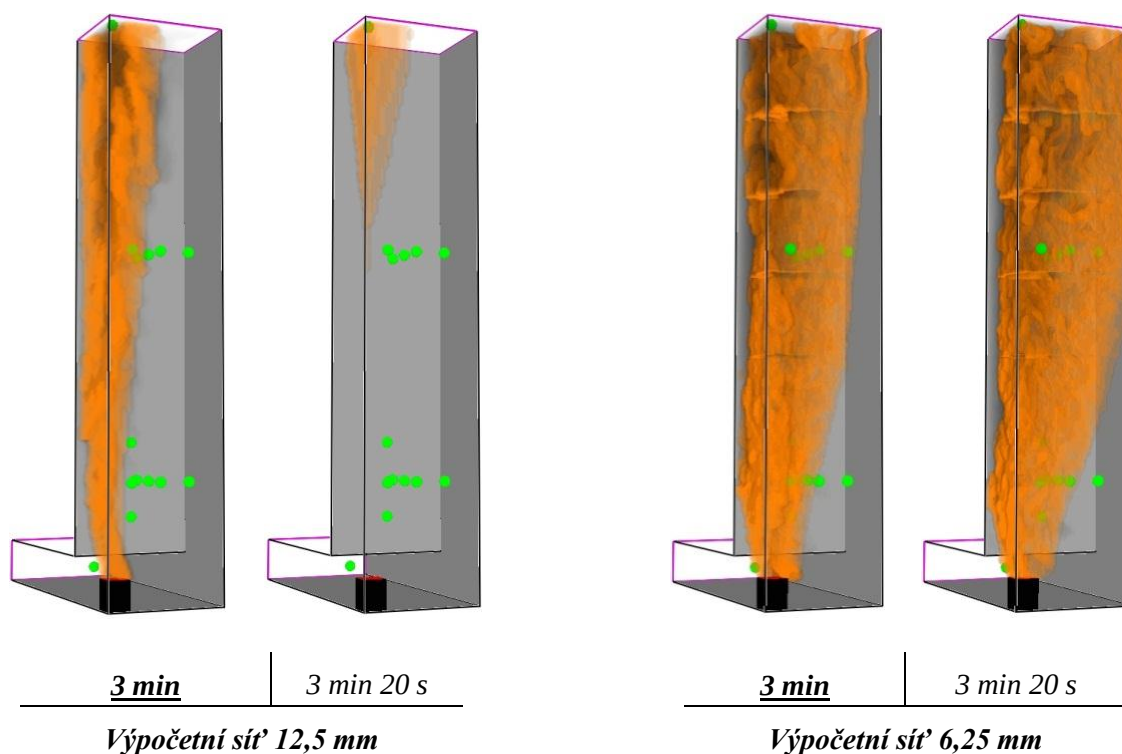
Předem očekáváno je rychlejší šíření plamene a větší poškození účinkem požáru u boční stěny než u stěny přední. Přední stěnu vytváří samotná hořlavá transparentní deska z PMMA,

zatímco stěnu boční vytváří ta samá deska z PMMA, avšak z konstrukčních důvodů kotvená na podkladní pórobetonové zdivo. Zatímco u přední stěny je umožněn přenos tepla kondukcí skrz tuto stěnu a její ochlazování konvekci okolním prostředím, u boční stěny toto ochlazování nenastává z důvodu přítomnosti podkladního zdiva. Naopak u boční stěny dochází ke kumulaci tepelné energie a zvyšování teploty desky z PMMA, která snáze dosáhne teploty vzplanutí a tím pádem začne dříve a intenzivněji hořet. Tento popsáný předpoklad potvrzuje jak laboratorní, tak CFD model. V rámci laboratorního pozorování je patrné, že boční stěna je účinkem požáru v šachtě poškozena téměř v celé své ploše (Obr. 3.25 (c)), zatímco přední stěna je poškozena v šířce cca 10–15 cm (Obr. 3.25 (b)). CFD model neumožňuje přímou analýzu poškození hořlavého povrchu, ale tu lze odhadnout na základě hořící plochy. Již cca ve 2. minutě je v simulaci patrné hoření boční stěny téměř v celé ploše, zatímco přední stěna hoří zatím jen na okraji přibližně v krajní čtvrtině (Obr. 3.25 (a)). O minutu později (3. minuta) již však v simulaci hoří přední stěna diagonálně, o další 2 minuty později (5. minuta) již v celé své ploše.



Obr. 3.26 Porovnání laboratorního měření (lab) a CFD simulace (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 6,25 mm: (a) vertikální rychlost šíření plamene po povrchu přední a boční stěny z PMMA; v grafu orientačně zaznamenána spodní (MIN) a horní (MAX) hranice plamene; (b) porovnání teploty na výškové úrovni „c“

Rychlejší rozvoj a intenzita požáru v simulaci jsou patrné i z průběhu teplot na výškové úrovni „c“ (Obr. 3.26 (b)). Laboratorně měřená teplota má výrazně rostoucí tendenci od 6. minuty a v okamžiku uhašení (9. minuta) nabývá maximálních hodnot okolo 700 °C. Během simulace je teplota maximální již ve 3. minutě (okamžik vypnutí hořáku), a dosahuje dokonce hodnot až okolo 1 100 °C.



Obr. 3.27 Odlišnosti v simulaci šíření plamene po přední a boční stěně z PMMA mezi výpočetní sítí 12,5 a 6,25 mm; vypnutí hořáku v 3. minutě – dále již hoří pouze PMMA

3.6.2.3 Závěr (Fáze 2)

Fáze experimentu 2 (průběžná šachta s částečným hořlavým opláštěním z desek z PMMA) je provedená ve dvou konstrukčních variantách (A, B) a s hlavním cílem ověření submodelu hoření v programu FDS. Ve variantě A je sledován rozvoj požáru po přední hořlavé stěně z PMMA, ve variantě B pak po přední a boční hořlavé stěně. Plynový hořák s nízkým tepelným výkonem (6 kW) je použit jako iniciační zdroj zapálení hořlavých stěn v šachtě a po určité době je vypnut. Následně je sledováno samovolné šíření plamene a rohový účinek požáru v šachtě. Na základě porovnání laboratorního a CFD modelu lze konstatovat následující závěry:

- **Výška plamene.** Ve fázi experimentu 2 je díky transparentní přední stěně možné orientačně porovnat výšku plamene od plynového hořáku na začátku experimentu, tj. v okamžiku, kdy se do procesu hoření nezapojuje hořlavý materiál. Simulovaná výška plamene je v určitých časových krocích až 2× větší než výška v laboratorních podmínkách.
- **Rozvoj požáru v šachtě a šíření plamene po hořlavém opláštění** jsou v CFD modelu výrazně rychlejší a intenzivnější než v modelu laboratorním, a to od prvních minut experimentu. Rychlost vertikálního rozvoje požáru u varianty B (hořlavá přední + boční stěna) je cca 2× vyšší než u varianty A (hořlavá pouze přední stěna).
- **Schopnost CFD modelu zapálit hořlavé opláštění a udržet plamen na jeho povrchu** je rozhodujícím způsobem ovlivněna velikostí výpočetní sítě. Hrubší výpočetní síť 25 mm i jemnější výpočetní síť 12,5 mm je sice schopná v obou variantách simulovat rozvoj plamene po výšce šachty, ale v okamžiku vypnutí plynového hořáku plamen uhasíná, což neodpovídá průběhu laboratorního experimentu. Udržet plamen po delší časový úsek je schopná až dále zjemněná výpočetní síť 6,25 mm, u které je však výpočetní doba enormně dlouhá. Avšak u varianty A i v případě takto jemné sítě dochází po cca 7 minutách k vyhasnutí plamene, zatímco v laboratorních podmínkách dochází k postupnému rozhořívání. Naopak u varianty

B je simulovaný rozvoj požáru a množství uvolněného tepla tak intenzivní, že pro jemnou výpočetní síť 6,25 mm to znamená neudržitelný způsob výpočtu, tj. numerickou nestabilitu.

- **Materiálová charakteristika.** Submodel hoření je dále závislý na vstupních datech (reakčních parametrech) charakterizujících daný hořlavý materiál, jejichž dostupnost bývá problematická (zejména referenční teplota a rychlost) a často podmíněna doplňujícím experimentálním měřením (např. termogravimetrická analýza).

3.6.3 Porovnání výsledků pro členěnou šachtu s nehořlavým opláštěním (Fáze 3)

Ve fázi experimentu 3 je použito stejně jako u fáze 1 (průběžná šachta) nehořlavé opláštění a řízený zdroj požáru (plynový hořák) s konstantním tepelným výkonem 20 kW. V horní části šachty je vytvořena pevná betonová přepážka s otvorem 100×200 mm, který je po 4 minutách postupně uzavírán ze 100 % své původní plochy na 50, 25 a 12,5 % (Obr. 3.4). V 16. minutě je hořák vypnut a dalších 5 minut sledována fáze chladnutí. V šachtě jsou využity shodné měřicí body jako u průběžné nehořlavé šachty, jen výšková úroveň „c“ s termočlánkem a rychlostní sondou (anemometrem) je posunuta o 100 mm výše nad stropní přepážku. Porovnání laboratorního a CFD modelu je v této kapitole provedeno jednak vizuálně a jednak numericky v grafech pro teplotu a rychlost proudění vzduchu ve vybraných měřicích bodech. Výsledky a srovnání pro ostatní měřicí body (teplota, tepelný tok) jsou pak pro úplnost uvedeny v Příloze 4.

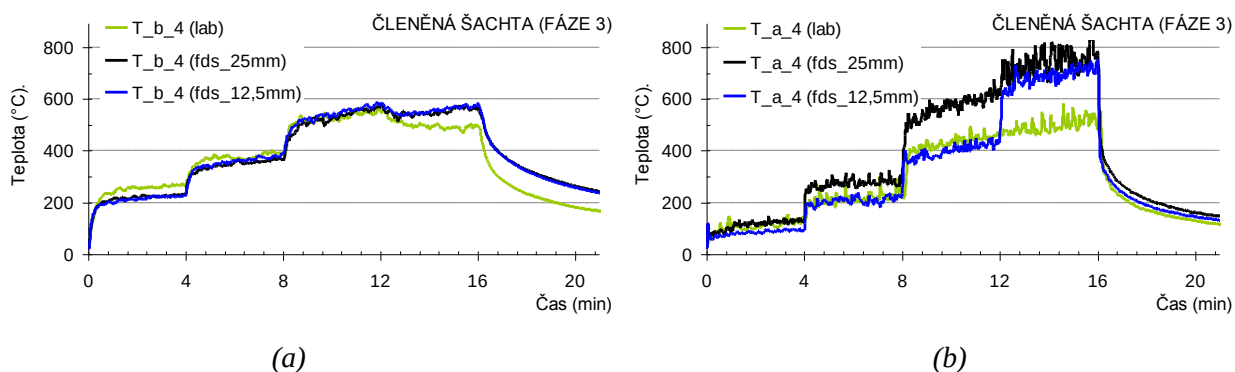
Vlivem uzavírajícího se otvoru dochází k přechodu od požáru řízeného palivem (dodávka propanu) k požáru řízenému odvětráním (dodávkou kyslíku pro spalování). Při plném 100 % otevření otvoru v přepážce je kladen určitý vřazený odpor proudu horkých plynů a kouři (fire plume), zatímco u nejmenšího 12,5 % otevření je vřazený odpor výrazně zvýšen a kouř je částečně kumulován uvnitř šachty.

Hlavní otázkou ve fázi experimentu 3 je ověřit riziko přeskočení plamene v členěné šachtě nad stropní přepážku vlivem zvyšující se hustoty a teploty kouřové vrstvy pod uzavírajícím se otvorem v přepážce, což zjednodušeně představuje různou velikost otvoru po případném vyhoření instalačních rozvodů na bázi plastů.

Dynamika požáru v členěné šachtě s určitou netěsností ve stropní přepážce reprezentovanou otvorem se začíná více podobat požáru v uzavřeném prostoru (např. místnosti) v porovnání s průběžnou šachtou, kde dominuje komínový efekt.

3.6.3.1 Numerické porovnání

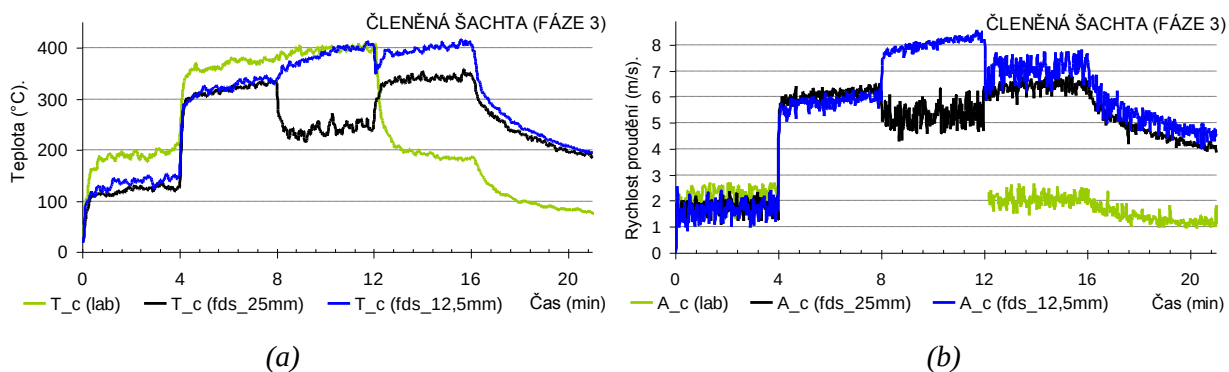
Jako reprezentativní bod pro numerické porovnání teplot je ze skupiny termočlánků vybrán prostřední termočlánek číslo 4. Na výškové úrovni „b“ se teploty měřené a simulované vyznačují velice dobrou shodou (Obr. 3.28 (a)), a to včetně skokového navýšení při postupném uzavírání otvoru v přepážce. To je dáno především polohou termočlánku T_b_4 uprostřed šachty, která je nejméně ovlivněna vzdušnými turbulencemi. U simulovaných teplot je rozdíl mezi hrubší (25 mm) a jemnější výpočetní sítí (12,5 mm) téměř nepozorovatelný. Naopak u termočlánku T_a_4 v blízkosti tunelu pro přívod vzduchu jsou turbulence výraznější a výrazněji se tím liší i laboratorní a simulované teploty (Obr. 3.28 (b)). U hrubší výpočetní sítě jsou již od 8. minuty (otevření otvoru 25 a 12,5 %) simulované teploty až o 200 °C vyšší ve srovnání s měřenými teplotami. Jemnější výpočetní síť vykazuje výbornou shodu až do 12. minuty, ale při nejmenším otevření otvoru v přepážce (12,5 %) jsou simulované teploty opět o cca 200 °C vyšší.



Obr. 3.28 Porovnání teplot uprostřed šachty mezi laboratorním měřením (lab) a CFD simulací (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm:

(a) výšková úroveň „b“, poloha T_{b_4} ; (b) výšková úroveň „a“, poloha T_{a_4}

Teplota nad otvorem ve stropní přepážce na výškové úrovni „c“ je turbulencemi ovlivněna nejvíce a laboratorní a simulované teploty se opět liší (Obr. 3.29 (a)). Při otevření stropní přepážky 100 a 50 % CFD simulace pro obě výpočetní sítě zhruba odpovídá trendu laboratorního měření, ale v okamžiku redukce otevření z 50 na 25 % (8. minuta) začíná docházet k zajímavým výrazným odlišnostem (Obr. 3.29 (a)). Laboratorní teplota pozvolna dále narůstá, ale simulovaná teplota ve výpočetní síti 25 mm skokem klesá o cca 100 °C. Přesně opačná situace je při další redukci otevření z 25 na 12,5 % (12. minuta), kdy laboratorní teplota dramaticky klesá o cca 200 °C, ale simulovaná teplota skokem roste o cca 100 °C. Simulovaná teplota v jemnější výpočetní síti 12,5 mm sleduje trend laboratorního měření až do 12. minuty, ale následně je při nejmenším otevření otvoru jejich vzájemný rozdíl ještě větší než v případě hrubší výpočetní sítě.



Obr. 3.29 Porovnání mezi laboratorním měřením (lab) a CFD simulací (fds) v programu FDS s výpočetní sítí 25 a 12,5 mm na výškové úrovni „c“:

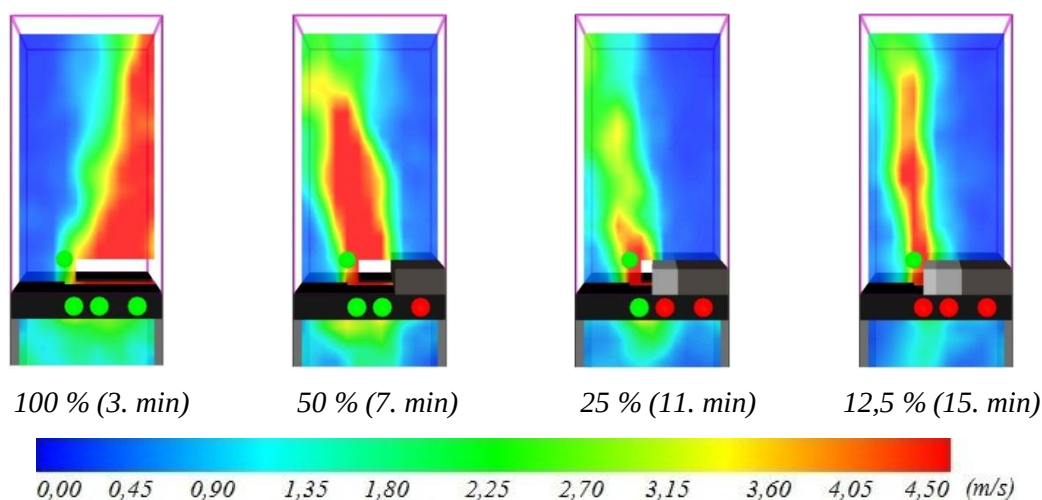
(a) teplota; (b) rychlost proudění (přerušená část – mimo měřicí rozsah anemometru)

Otázkou je, co způsobuje výrazné poklesy teplot nad přepážkou?

V případě laboratorního měření je pokles teploty v 12. minutě způsoben pravděpodobně přechodem mezi požárem řízeným palivem na požár řízený atmosférou (otevření 12,5 %). Nedostatečný odvod kouře vytvářející přetlak v šachtě brání přístupu čerstvého vzduchu potřebného pro „dokonalé“ spalování propanu v hořáku a tepelný výkon hořáku klesá.

V případě CFD simulace s hrubší výpočetní sítí 25 mm pokles teploty v 8. minutě není způsoben tepelným výkonem hořáku, jelikož v tento okamžik (otevření 50 %) je požár stále převážně řízen odvětráním. Pokles teploty je způsoben pouze změnou tvaru vzdušného proudu nad přepážkou, kdy se měřicí bod dostává na okraj oblasti s nejvyšší teplotou a rychlostí

proudění (Obr. 3.30). Po další redukci otevření z 25 na 12,5 % se měřicí bod dostává opět do oblasti vyšších teplot a rychlosti proudění. Pokles teplot a rychlosti proudění u jemnější výpočetní síť 25 mm není pozorován.



Obr. 3.30 Kontury rychlosti proudění vzduchu (barevné izoplochy) ve svislé podélné rovině vedené měřicím bodem A_c (simulace v FDS se sítí 25 mm, vizualizace v SMV)

3.6.3.2 Vizuální porovnání

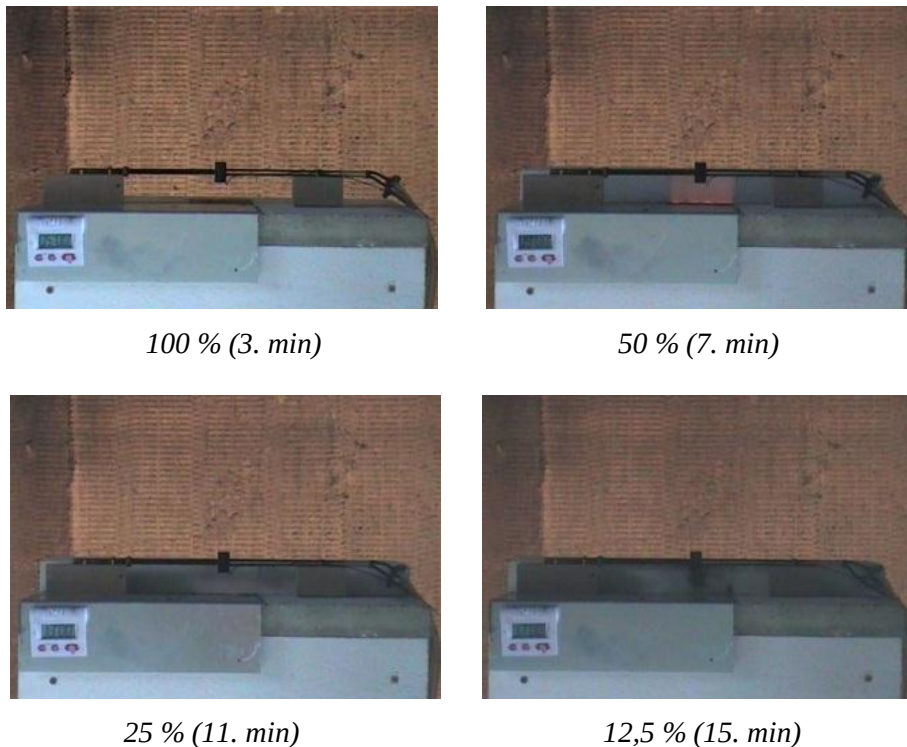
Při laboratorním experimentu je sledována možnost přeskočení plamene z úrovně řízeného zdroje požáru (hořáku) nad stropní přepážku a je proveden videozáznam zaměřený na horní část šachty (Obr. 3.31). Z videozáznamu jsou pak pořízeny fotografie ve všech 4 velikostech otevření otvoru (Obr. 3.32), a to vždy 1 minutu před následující redukcí otvoru (tj. ve 3., 7., 11. a 15. minutě). Fotografie s otevřením 100, 50 a 25 % se téměř neliší, pouze u fotografie s otevřením 12,5 % je při detailnějším pohledu patrná vyšší úroveň zakouření v oblasti nad přepážkou.



Obr. 3.31 Laboratorní pozorování zakouřené oblasti nad stropní přepážkou členěné šachty v okamžiku vypnutí hořáku (16. minuta, otevření otvoru 12,5 %)

Při požáru v uzavřeném prostoru (např. místnost s okny) se zápalná teplota kouře nad ohniskem lokálního požáru pohybuje okolo 500–600 °C (Karlsson & Quintiere, 2000), jež může v takto zasaženém prostoru způsobit tzv. prostorové vzplanutí (flashover efekt) nahřáté akumulované vrstvy kouře v horní části místnosti. Ta začíná hořet v celém svém objemu, začínají hořet i další exponované předměty a nově vznikající kouř s plameny jsou vlivem vzrůstajícího přetlaku vytlačovány ven z hořícího prostoru otvory v obvodových konstrukcích, tj. například okny v případě ilustrativní hořící místnosti nebo otvorem ve stropní přepážce v případě modelu členěné šachty. V porovnání s těmito teplotami laboratorní termočlánky na výškové

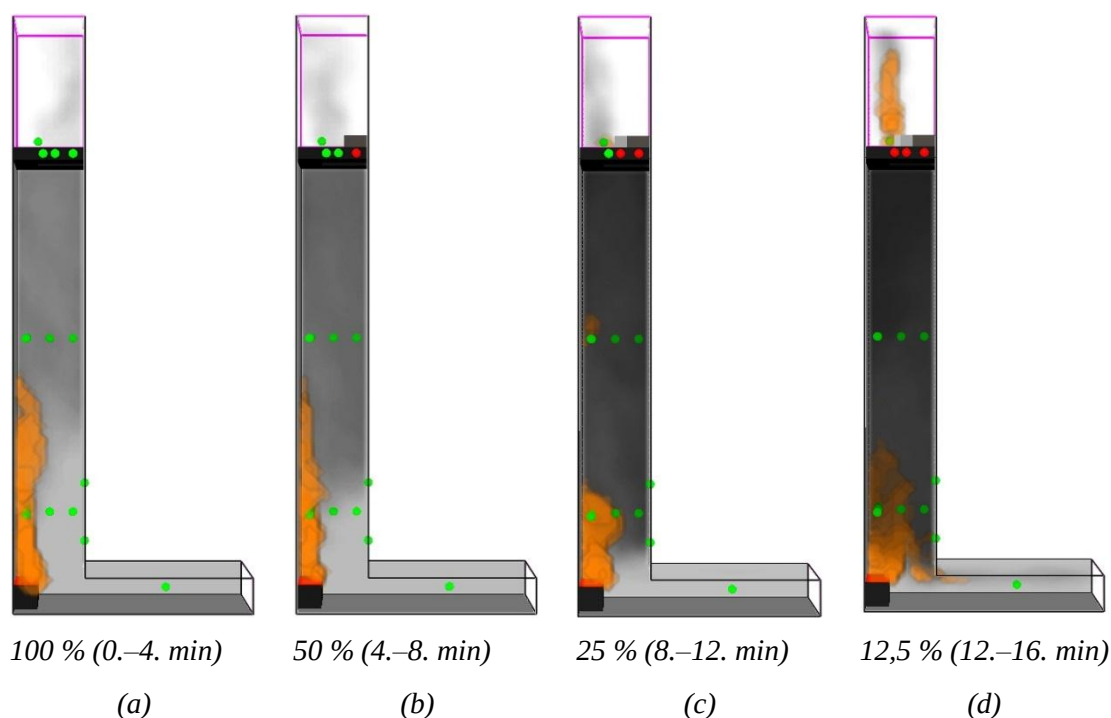
úrovni „c“ (měřicí bod T_c) ukazuje ve 12. minutě maximální teplotu pouze okolo 400 °C (Obr. 3.29 (a)). Vzhledem ke skutečnosti, že tento termočlánek se nachází těsně nad otvorem v přepážce, dá se předpokládat i velmi podobná teplota kouře pod přepážkou a ta nedosahuje zápalné teploty kouře. ***V průběhu laboratorního experimentu není pozorován žádný přeskok plamene nad stropní přepážku.***



Obr. 3.32 Fotografie pořízené z videozáznamu během laboratorního pozorování oblasti nad stropní přepážkou (přední pohled)

CFD simulace s využitím vizualizace v programu SMV predikuje zásadně odlišné chování plamene uvnitř šachty a nad přepážkou, a to jak v případě výpočetní sítě 25, tak 12,5 mm. Při otevření otvoru v přepážce 100 a 50 % se plamen chová podobně klidným způsobem jako v případě průběžné šachty (fáze 1), kde se jedná o požár řízený palivem (propanem). Při další redukci otvoru na 25 % se vizuálně zvyšuje koncentrace kouře, plamen začíná být z důvodu omezené dodávky vzduchu kolísavý a na příslušném vizualizačním snímku je patrný i první zatím jen občasný přeskok malého plamene do kouřové vrstvy a nad přepážku (Obr. 3.33 (c)). Po další redukci otvoru na minimální otevření 12,5 % dochází k dalšímu zvýšení hustoty kouře v šachtě a chování plamene je výrazně proměnlivé s tendencí „sáhnout“ si pro čerstvý kyslík do tunelu pro přívod vzduchu (Obr. 3.33 (d)).

Nejzajímavější simulovaný jev však nastává v oblasti nad stropní přepážkou, kde dochází nikoliv k občasnému přeskoku či prošlehnutí plamene, ale k trvalému plamennému hoření po dobu 4 minut, dokud není plynový hořák v 16. minutě vypnut. Ani v tomto případě není simulovaná teplota na výškové úrovni „c“ dostatečná k zapálení kouře, jelikož se jedná pouze o teplotu okolo 350 °C (Obr. 3.29 (a)).



Obr. 3.33 *CFD simulace chování kouře a plamene v modelu členěné šachty pro různou velikost otvoru ve stropní přepážce (výpočet v programu FDS s výpočetní sítí 25 mm; vizualizace v programu SMV)*

3.6.3.3 Závěr (Fáze 3)

Pro fázi experimentu 3 (členěná šachta s nehořlavým opláštěním) není v laboratorním modelu pozorován žádný přeskok ani prošlehnutí plamene z úrovně hořáku nad stropní přepážku. Naopak CFD simulace s výpočetní sítí 25 i 12,5 mm predikuje již při otevření otvoru 25 % ve stropní přepážce občasné přeskoky a prošlehnutí plamene, při minimálním otevření 12,5 % již dokonce trvalé plamenné hoření nad přepážkou.

Při porovnání teplot je docílena nejlepší shoda uprostřed výšky šachty (výšková úroveň „b“). Ve spodní části šachty nad hořákem (výšková úroveň „a“) se jako u průběžné šachty projevuje vliv turbulencí zejména u přední stěny a teplotní rozdíly jsou výraznější. Nad přepážkou (výšková úroveň „c“) je tendence shody teplot pouze při větším otevření otvoru v přepážce 100 a 50 %, dále se již teploty a rychlost proudění značně rozcházejí. Teploty měřené i simulované v těsné blízkosti nad přepážkou (maximálně okolo 400 °C) nedosahují hodnot pro vzplanutí kouřové vrstvy (500 – 600 °C) a nemělo by tudíž vůbec docházet k hoření nad přepážkou.

Při otevření otvoru v přepážce 25 a 12,5 % je výkon hořáku v laboratorním modelu pravděpodobně řízen odvětráním kvůli nedostatku kyslíku pro spalování propanu, naopak neměnný výkon hořáku v CFD simulaci je prokazatelně stále řízen palivem.

3.7 Nejistoty měření a počítačové simulace

Nejistoty (chyby) v měření jsou dány jednak nepřesností měřicích zařízení uváděných v kalibračních listech a jednak podmínkami, ve kterých je měřeno.

Teploty jsou měřeny termočlánky s uváděnou nejistotou cca ± 2 %. Při měření za vysokých teplot (požár v šachtě) může být však chyba měření vůči skutečné teplotě výrazně vyšší z důvodu

použití nechráněných termočlánků a v aktuálním měření je odhadována nejistota až okolo $\pm 20 \%$ (Shannon & Butler, 2003).

Rychlost proudění za vysokých teplot v šachtě je měřena obousměrnou rychlostní sondou v kombinaci s tlakovým převaděčem. Nejistota samotného převaděče tlaku je uváděna okolo 1 %, avšak nejistoty měření spojené s obousměrnou kovovou sondou bývají až okolo 5 % (McCafferey & Heskestad, 1976). Sondy jsou značně citlivé i na svůj náklon (vychýlení) a další chyba měření může být až $\pm 4 \%$ při náklonu 5° (Sette, 2005). Měření rychlosti proudění v přírodním tunelu (pouze u fáze experimentu 1) je prováděno příručním dataloggerem s uváděnou nejistotou měření cca $\pm 0,8 \%$.

Celkový dopadající tepelný tok je měřen vodou chlazenými radiometry s uváděnou nejistotou cca $\pm 3 \%$. V aktuálním měření je s ohledem na starší záznamové zařízení (liniový zapisovač) a s ohledem na obecnou problematiku měření tepelného toku (Andersson & Wetterlund, 2001) odhadována nejistota okolo $\pm 10 \%$.

Nejistoty počítačové simulace. Program FDS byl tvůrci původně zamýšlen především pro simulace a analýzy průmyslových požárů. Jeho využití je nejefektivnější, pokud je specifikována rychlost uvolňování tepla (HRR) a sledován transport tepla a kouře. V tomto případě CFD model predikuje teploty a rychlost proudění s nejistotou okolo 10–20 % v porovnání s experimentálními měřeními, a to především v závislosti na velikosti výpočetní sítě (McGrattan, a další, 2007). Tuto skutečnost velice dobře potvrzuje zejména fáze experimentu 1 (průběžná šachta s nehořlavým opláštěním). Nicméně, pro požární scénáře, ve kterých není množství uvolněného tepla přímo specifikováno, ale CFD model ho předpovídá na základě definovaných požárnětechnických charakteristik hořlavých materiálů, mohou být nejistoty výpočtů vyšší. Tuto skutečnost opět potvrzuje fáze experimentu 2 (průběžná šachta s částečným hořlavým opláštěním).

Kapitola 4:

Experiment 2 – Kalorimetrické zkoušky bytových jader panelových domů

4.1 Úvod

V rámci této kapitoly je nejprve věnována pozornost obecné požární problematice bytových a elektroinstalačních šachet v panelových objektech na úrovni analýzy současného stavu. Následuje vlastní experimentální část zaměřená na hořlavá opláštění v systému lehké prefabrikace bytových jader. Při rekonstrukcích bylo odebráno **5 sad různých vzorků stěnových panelů (příček) bytových jader a ty pak podrobeny vysokoteplotnímu namáhání v kónickém kalorimetru**, a to za účelem získání požárnětechnických parametrů (např. rychlosti uvolňovaného tepla).

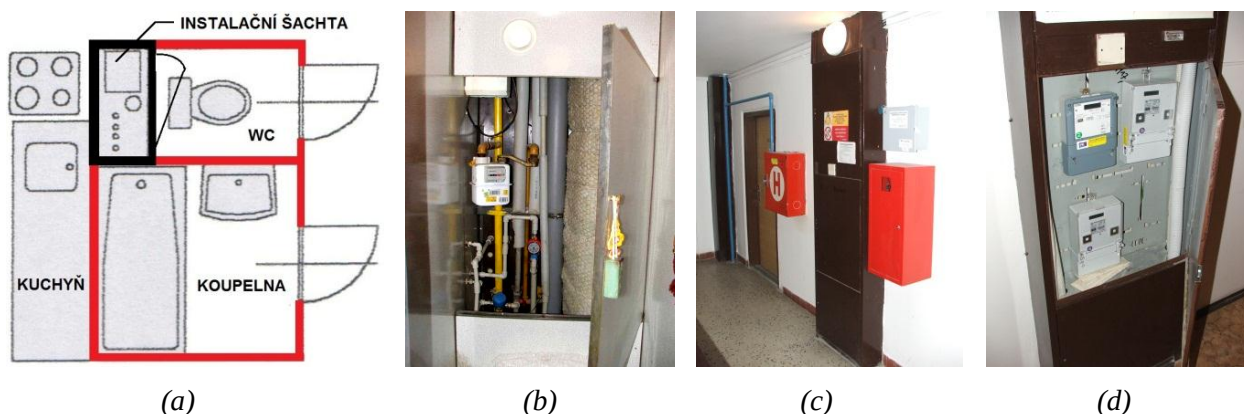
V disertační práci bylo původně zamýšleno využít naměřená data pro požární CFD simulace šachtového prostoru, ale jak naznačil první experiment (Kapitola 3), modelování rozvoje požáru a šíření plamene po povrchu hořlavých prvků je natolik náročnou úlohou, že bylo přistoupeno k výraznému zjednodušení okrajových podmínek. Pro opláštění modelu šachty tak bylo použito náhradního hořlavého materiálu – polymetylmetakrylátu (plexiskla), místo materiálů odebraných ze stávajících bytových jader. Experiment tak bylo možné provést ve větším měřítku a s výhodou byla využita i průhlednost plexiskla. Výsledky z kónické kalorimetrie pro vzorky hořlavých bytových jader jsou však natolik unikátní a v literatuře nedostupné, že jsou v disertační práci uvedeny a mohou tak být v praxi uplatněny například jako podklad při rekonstrukcích požárů nebo v rámci zjišťování příčin reálných požárů.

4.2 Instalační šachty v panelové bytové výstavbě

Charakteristickým rysem výstavby bytových domů **v období 1958–90 je převažující podíl panelové technologie**. Součástí těchto technologií je i využívání prefabrikovaného kompletu sanitárně hygienického zařízení, tzv. „bytového jádra“ (Obr. 4.1). Pro kompletaci panelových domů v tomto časovém období bylo v rámci České republiky vyrobeno a **zabudováno okolo 1 180 000 kompletů bytových jader s přímou návazností na instalační šachty**. Z tohoto množství představují bytová jádra **lehké prefabrikace cca 93–95 %, zbývajících 5–7 % jsou jádra železobetonová**. Rozsah a tempo přestavby bytových jader souvisí s jejich končící životností. Fyzická životnost pro karoserii (příčky, podhledy, podlahové dílce) je u lehké prefabrikace průměrně uváděna okolo 30–35 let, u jader železobetonových až okolo 80 let. Podobná životnost je odhadována i pro stávající odpadní systém z PVC, ventilaci či elektroinstalace. U kovových rozvodů vody a topení je životnost odhadována na 10–20 let, v případě rozvodů z plastů pak výrazně vyšší (20–40 let pro studenou a až 50 let pro teplou vodu). Morální životnost z pohledu uživatelů bytových jader bývá nižší, zejména pak u lehké prefabrikace (Kolektiv autorů, 1998).

Končící fyzická životnost se dotýká i elektroinstalačních šachet, které se na rozdíl od bytových šachet nachází ve společných částech bytových domů (schodiště). **Společným negativním jmenovatelem bytových jader s instalační šachtou a elektroinstalačních šachet je značné požární riziko potvrzené nesčetnými a velice závažnými požáry**. Původní nejčastěji hořlavá umakartová bytová jádra jsou riziková zejména z hlediska vertikálního šíření požáru šachtou do vyšších podlaží včetně střechy (Obr. 4.2). Naopak stávající elektroinstalační kabelové rozvody v šachtách s jednoduchým plechovým opláštěním (Obr. 4.1 (c), (d)) představují nejvyšší

riziko s ohledem na přímou návaznost na schodišťový prostor, který je často jedinou únikovou možností z objektu.



Obr. 4.1 (a) příklad dispozice bytového jádra; (b) revizní dvířka v umakartové šachtové stěně; (c) + (d) elektroinstalační šachta ve schodišťovém prostoru panelového bytového domu

Nicméně k panelovým objektům stejně jako k ostatní starší nebo historické výstavbě procházející svým vývojem je nutné nahlížet s jistou retrospektivou a **není racionální ani účelné je posuzovat z hlediska dnešní požární legislativy**. Koncem sedmdesátých let minulého století byl představen požární kodex, na jehož základech stojí požární legislativa dodnes. Princip je postaven zejména na omezení šíření účinku požáru v objektech formou pasivní (konstrukční) a aktivní požární ochrany. Vnitřní prostory jsou členěny do požárních úseků, zatímco objekty realizované do konce 70. let byly v podstatě řešeny jako jeden požární úsek a eliminace šíření účinků požáru se docílovala odlišným, méně účelným způsobem.

4.2.1 Bytová jádra s instalační šachtou

V průběhu výstavby mnoha typů stavebních soustav panelových objektů podstupovala bytová jádra rovněž svůj vývoj provázený četnými konstrukčními a materiálovými změnami (Tab. 4.1). Svůj „rukopis“ na bytových jádrech nesou i jednotliví výrobci – panelárny rozmístěné ve strategických lokalitách po celém území tehdejšího Československa (ZSP n. p. – Boletice nad Labem, KOVONA n. p. – Karviná, OCELOVÉ KONŠTRUKCIE – Žilina, PREFA n. p. – Přeštice, PRŮMSTAV – Praha, PS – Brno).

Tab. 4.1 Přehled typů bytových jader v panelových bytových domech (Kolektiv autorů, 1998)

Bytová jádra lehké prefabrikace (1958–90)	Bytová jádra železobetonová (1968–90)
B-2 – stavebnicový – deskový (1958–68)	H-3 – prostorový; žlb. varianta B-3 (1968–79)
B-3 – sektorový – prostorový (1961–80)	H-10 – prostorový; žlb. varianta B-10 (1980–90)
B-4 – stavebnicový – deskový (1966–72)	SKB 1,2 – prostorová (nedatováno)
B-6 – stavebnicový – kostrový (1972–80)	ŽB – stavebnicový – panelový (nedatováno)
B-63 – monoblokový – prostorový (1980–90)	
B-7 – stavebnicový – deskový (1972–81)	
B-9 – stavebnicový – deskový (1981–90)	
B-91 – monoblokový – prostorový (1981–90)	
B-10 – sektorový – prostorový (1981–90)	
B-10 M – sektorový – prostorový (1981–90)	

Vysoká rychlost vertikálního šíření požáru mezi podlažími skrz instalační šachty je pozorována především u bytových jader lehké prefabrikace. Hořlavé konstrukce jsou používány jak pro příčky mezi místnostmi, tak pro opláštění šachtového prostoru. Požárně nejproblematictější jsou zejména bytová jádra B-2, B-3 a B-4 s vysokým podílem různých vysoce hořlavých výrobků na bázi plastů a dřeva, jako například:

- umakart či probarvené fólie oboustranně laminované do melaminové pryskyřice – vnější tenkovrstvá povrchová úprava stěnových panelů (příček);
- pěnový polystyren a zpěněné PVC – výplně stěnových panelů;
- polyesterový skelný laminát – ventilační potrubí, vana, umývadlo, podstropní nástavce;
- výrobky z PVC – odpadní kanalizační potrubí, podlahová krytina, sprchové závěsy;
- polyamid – háčky, věšáky, drobné vybavení; lisované reaktoplasty – drobné doplňky;
- polyvinylacetát – nátěry, lepidla;
- pryžové profily – těsnění;
- dřevěná kostra uvnitř umakartových stěnových panelů, tvrzené lisované desky na bázi dřevitých recyklátů (např. Sololit), dřevovláknité desky v podhledech;
- desky z lněného pazdeří (např. typ Lenex) apod.

Celková hmotnost těchto vysoce hořlavých materiálů, při jejichž tepelném rozkladu vznikají nebezpečné toxické látky, může činit u jednoho bytového jádra i více než 200 kg (Witzany & Kupilík, 1997-99). Na bytové jádro dále téměř vždy přímo navazuje „hořlavá“ kuchyňská linka většinou ze dřeva nebo z recyklátů na bázi dřeva (Obr. 4.1), která je propojena s šachtou instalačními rozvody z plastů (kanalizace, vodovod) a vzduchotechnickým odtahem pro digestoře.



(a)



(b)

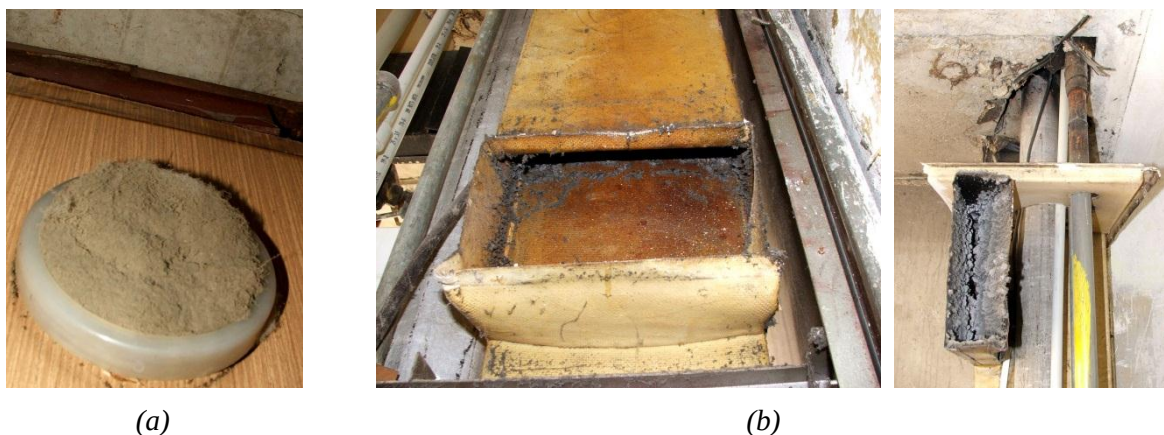


(c)

Obr. 4.2 *Požár bytu v panelovém objektu v Čelákovících u Prahy, 2007 (Obr. 2.1 (c)):*
 (a) pohled na zcela shořelé opláštění bytového jádra + plechová clona v místě kuchyňského sporáku (místo ohniska požáru); (b) pohled na betonovou stropní přepážku s výraznými netěsnostmi; (c) přeskok požáru šachtou na dřevěnou dvouplášťovou střechu

Na bytové jádro může požár působit buď celkově, nebo lokálně. Při celkovém působení vzniká požár mimo jádro v obytných místnostech, při lokálním působení je ohnisko požáru v jádře nebo jeho těsné blízkosti. Příčina požáru bývá většinou na kuchyňském sporáku či elektrospotřebičích (varné konvice, toustovače, koupelnové infrazářiče apod.). V prvním případě

je rychlost přenosu požáru na bytové jádro a šachtu závislá na požární odolnosti dělicích bytových příček ohraničujících jádro, dispozičním řešením bytů, velikosti požárního zatížení v bytě a na způsobu okamžitého propojení jednotlivých místností, kde mohou mít značný vliv i otevřené dveře. Tomuto způsobu přenosu požáru není bytové jádro schopné delší dobu odolávat, neboť lehká a hořlavá dělicí konstrukce vlastního jádra má požární odolnost nedostatečnou. Při lokálním působení požáru na jádro mohou doplňkové ochranné konstrukce (např. hliníkové clony) omezit přenos ohně na bytové jádro, například při vzplanutí tuků na sporáku nebo při jeho havárii. Při intenzivním nebo déle trvajícím působení žaru však ani hliníková clona nemůže rozšíření požáru zabránit (Obr. 4.2 (a)).



Obr. 4.3 Nečistoty usazované ve ventilačním potrubí zaznamenané při demontážích bytových jader: (a) prach a vlasy nahromaděné pod krytem ventilátoru v koupelně; (b) mastnota a prach ve sklolaminátovém VZT potrubí

Hlavní cestou vertikálního šíření požáru jsou otvory po vyhořelém potrubí z plastů a též svislý ventilační tah (VZT), kterým nejprve unikají zplodiny hoření a následně může dojít i k prošlehnutí plamene. Rychlost šíření požáru vertikálním směrem je určena především požární odolností konstrukcí ohraničujících ventilační šachtu a hořlavostí vlastních materiálů ventilačních tahů. Šíření požáru může být výrazně ovlivněno i hořením plynu po odpadnutí plynoměru v případě, že nedojde k okamžitému uzavření plynového stoupacího potrubí hlavním uzávěrem v objektu. V první výrobní sérii bytových jader byly svislé **ventilační tahy vyráběny z polyesterového skelného laminátu**. Tento materiál vykazuje sice značnou odolnost proti korozi, ale z hlediska požární bezpečnosti je zcela nevhodný, neboť je vysoce hořlavý, prochází všemi podlažními a vytváří tak výrazný požární most. K šíření požáru tak dochází především vzplanutím materiálu vlastních ventilačních tahů a nečistot v nich usazovaných (Obr. 4.3). U dalších výrobních sérií byl laminát nahrazen pozinkovaným plechem, který sice odstranil rizika hoření vlastních ventilačních tahů, ale naopak hrozila možnost rozšíření požáru v důsledku vzplanutí stěn bytového jádra od rozpáleného plechového potrubí, kterým při požáru mohou procházet plynné zplodiny požáru o teplotách okolo 600–800 °C nebo kterým může prošlehávat i plamen. Na základě těchto skutečností byly nahrazeny laminátové odtahy plechovými, svislé a vodorovné potrubí opatřeno tepelnou izolací z minerálně vláknitých materiálů a vnitřní šachtový prostor opatřen betonovými přepážkami v úrovni stropů (Obr. 4.4). Rozbory skutečných bytových požárů prokázaly, že má tato okolnost velký vliv na omezení přenosu požáru komínovým efektem mezi podlažními.

Ani tyto popsané úpravy bytových jader nemohly zcela zaručit požadavky požární bezpečnosti. Proto se přešlo k vývoji a ověřování nových typů bytových jader, která by splňovala

nedostatky předchozích typů a odpovídala by platným požárními normám. Představiteli těchto nových typů byla bytová jádra B-6 a B-7. Nové typy nebyly vyvolány pouze požárními požadavky, ale i větší dispoziční variabilitou, vyšším standardem bytového vybavení, větším užitným prostorem koupelny, zlepšením větracího systému a v neposlední řadě i snazší dopravou, skladováním a montáží. Zatímco bytová jádra B-3 a B-4 i po provedených protipožárních úpravách vykazovala požární odolnost pouze 35 minut (plechové ventilační průduchy a obložení Hobrexem), mělo bytové jádro B-6 požární odolnost až 80 minut, B-7 dokonce 108 minut. Při tom bylo použito plechových ventilačních odtahů s vnějším obložением Hobrexem, vnitřním obložением instalační šachty nehořlavým materiálem a krytem instalační šachty z ocelového plechu. Dalším zdokonaleným typem bytového jádra se stala prostorová verze unifikovaného typu jádra B-10, která již plně vyhovovala požadavkům tehdejší úrovně požární ochrany. Příčky i podhled koupelny a WC tohoto typu tvoří sendvičové konstrukce o jednotné tloušťce 30 mm, podlahu ve WC a koupelně pak podlahový panel upevněný na konstrukci ocelových základových rámců (Witzany & Kupilík, 1997-99).

Nejspolehlivějším řešením požárních rizik spojených zejména s prvními výrobními sériemi hořlavých bytových jader je jejich demontáž a realizace nových jader vyzdívaných, případně kostrových s nehořlavým deskovým opláštěním. Na trhu jsou v současné době rovněž dostupné **deskové obklady imitující nejrůznější povrchy a využívající stávajícího jádra jako nosiče**. Jedná se o tenkovrstvé prvky o tloušťce okolo 5 mm vyráběné lisováním dřevitého recyklátu za vysokého tlaku a teploty. Jejich výhodou je především výrazně nižší cena a jednoduchost montáže, kdy není nutná demontáž stávajícího jádra. Z požárního hlediska se však jedná o přidání další hořlavé vrstvy na povrch již tak problematických bytových jader. Podobný problém rovněž představují **podhledové desky z expandovaného polystyrenu** lepené na spodní líc stropu.



Obr. 4.4 Spodní a horní pohled na stropní přepážku v instalační šachtě (umakartové bytové jádro)

V rámci průběžných sanací panelové výstavby dochází často k výměně původních nehořlavých instalačních rozvodů (plechové, ocelové či litinové potrubí) za rozvody na bázi plastů. **Stropní betonové přepážky bývají často narušeny nebo dokonce i úplně odstraněny** (Obr. 4.4 (a)) a společně s možností odhoření potrubních instalací mají výrazně nižší účinnost z hlediska šíření požáru šachtou. Pokud bytová šachta netvoří samostatný požární úsek, pak při jakékoliv změně stavby v panelovém bytovém domě dotýkající se šachty je však **požadována v úrovni stropu požární přepážka s požadovanou požární odolností EI 30 DPI s požární utěsněnými průstupy**. Tento normový požadavek (ČSN 73 0834, 2011) uvádí Příloha A normativního charakteru a celá norma je navíc právě závazná (Vyhláška č. 23 Sb., 2008). Přepážka tak musí být nejen pečlivě dobetonována, ale zejména kanalizační potrubí na spodním lici přepážky opatřeno požární manžetou.

4.2.2 Elektroinstalační šachty v únikových cestách

Vysoké požární riziko u stávajících elektroinstalačních šachet s plechovým opláštěním představuje možnost **hoření kabelových rozvodů přímo v únikové cestě** (Obr. 4.5), která je navíc téměř vždy jedinou únikovou možností z domu. Původní kabelové rozvody s hliníkovými vodiči jsou náchylnější k přehřívání a zkratu. **Problém stárnoucích hliníkových vodičů spočívá v jejich sublimaci**, čímž se zmenšuje jejich průměr a dochází tak k povolování elektroinstalačních šroubovaných svorek. V uvolněném spoji tak vzniká mezera, která následně bývá příčinou zkratu doprovázeného jiskřením a rizikem následného hoření kabelových izolací z měkčeného PVC.

Plechové opláštění šachet a revizní dvířka pro přístup k elektroměrům a jističům nevykazují dostatečnou těsnost a při hoření kabelových instalací hrozí velice rychlé zaplnění prostoru schodiště kouřem a toxickými, vysoce kyselými zplodinami hoření. V těchto kritických případech může být zcela znemožněna evakuace v podstatě celého domu, zejména pak podlaží nad ohniskem požáru. Situace bývá extrémně kritická u soustav se schodištěm uvnitř dispozice domu, kterou dále může zhoršovat nepřipustné skladování hořlavých materiálů přímo v únikové cestě (botníky, kočárky, jízdní kola apod.). Při zakouření vnitřního schodiště bez oken v obvodových stěnách je životně důležitá možnost odvětrání schodiště v nejvyšším místě. Zde byly navrhovány **odvětrávací střešní světlíky zasklívané drátosklem a ovládané mechanicky ocelovým lankem z každého podlaží** (Obr. 4.5 (c)). Nedostatečná údržba, tím pádem nefunkčnost společně s častými mechanickými zásahy do těchto světlíků (např. jejich nesmyslné přišroubování) znemožní požární odvětrání do doby příjezdu hasičů. I v tuto chvíli však je otevření světlíků otázkou dalších minut, které mohou být otázkou přežití osob nacházejících se v bytech v blízkosti pásma silného zakouření.



Obr. 4.5 (a) elektroinstalační šachta s plechovým opláštěním s přímou návazností na únikovou cestu; (b) požár šachty ve všech podlažích (Hošek, 2009); (c) mechanické otevírání střešního světlíku pro možnost požárního odvětrání – ocelové lanko v každém podlaží na schodišti; (d) nová konstrukce montované šachtové stěny (kovová kostra zatím bez deskového opláštění) + požárněodolný elektrorozvaděč

V porovnání s bytovými šachtami, které prochází soukromými prostory, je výměna stávajících elektroinstalačních šachet v panelových objektech výrazně snazší záležitostí s ohledem na celkovou přístupnost ze společných částí domu. Nové stoupací kabelové rozvody jsou jednoduše zakryty požárněodolnými zděnými nebo montovanými šachtovými stěnami a instalační prostupy požárně dotěsněny. Elektroměry a pojistky jsou pak umísťovány za požární revizní dvířka nebo do kovových požárněodolných elektrorozvaděčů (Obr. 4.5 (d)).

4.3 Analýza vzorků bytových jader v kónickém kalorimetru

Tato kapitola po konstrukčně materiálové stránce nejprve popisuje různé sady vzorků hořlavých stěnových panelů bytových jader v systému lehké prefabrikace, které byly odebrány při rekonstrukcích bytových jednotek. Stručně je charakterizována metoda měření s využitím kónického kalorimetru, při níž byly vzorky vystaveny vysokoteplotnímu namáhání a následně prezentovány neměřené výsledky.

4.3.1 Popis vzorků

Během roku 2010 autor navštívil různé bytové jednotky pražských panelových bytových domů, ve kterých probíhala demontáž hořlavých jader. Odebrány byly **odlišné vzorky stěnových panelů (příček) použité i pro opláštění v místě instalační šachty**. Jelikož se postupně při dalších návštěvách typy jader opakovaly, byla vytvořena reprezentativní sada pěti vzorků označených písmeny A až E (Obr. 4.6). Ani u jednoho jádra se nepodařilo dohledat jeho identifikační štítek vlepovaný při výrobě nebo montáži na vnitřní povrch instalační šachty. Z tohoto důvodu a dále kvůli nedostupnosti podrobnějších informací v literatuře **nebylo možné přiřadit ke vzorku konkrétní typ jádra**. Informace o dílčích tenkostěnných vrstvených konstrukcích (např. umakart) používaných v době realizace bytových jader lze dohledat ve starší literatuře (Kupilík, Písemná práce z kandidátského minima, 1975). Pro možnost požárního testování v kónickém kalorimetru byly **vzorky nařezány na rozměr 100 × 100 mm**.



Obr. 4.6 Odebrané hořlavé vzorky (A–E) stěnových panelů (příček) v bytových jádrech

Vzorek A

- sendvičový stěnový panel, tloušťka cca 28 mm
- nosná kostra: dřevěné latě s vnitřní izolační výplní z expandovaného polystyrenu, tloušťka cca 22 mm
- povrchová vrstva: tvrzená lisovaná dřevovláknitá deska – pravděpodobně typ Sololit, povrchová fólie imitující dřevo oboustranně laminovaná do melaminové transparentní pryskyřice, tloušťka cca 3 mm

Vzorek B

- sendvičový stěnový panel, tloušťka cca 28 mm
- nosná kostra: dřevěné latě s vnitřní izolační výplní z expandovaného polystyrenu, tloušťka cca 26 mm

- povrchová vrstva: umakart, tj. vrstvený natronový papír vzájemně pojený fenolformaldehydovou pryskyřicí, povrchová fólie imitující dřevo oboustranně laminovaná do melaminové pryskyřice, tloušťka cca 1 mm

Vzorek C

- sendvičový stěnový panel, tloušťka cca 24 mm
- nosná kostra: dřevěné latě s vnitřní izolační výplní z pěnového PVC, tloušťka cca 22 mm
- povrchová vrstva: stejná jako u vzorku B, pouze povrchová fólie v barvě „mořská modř“

Vzorek D

- dvouvrstvá tvrzená lisovaná deska – pravděpodobně typ Sololit, tloušťka 2× cca 3 mm
- bez vnitřní tepelné izolace; kotvený na ocelový rám kolem instalační šachty
- povrchová vrstva: barevná fólie oboustranně laminovaná do melaminové transparentní pryskyřice; modrá barva fólie směrem do šachty, bílá směrem do interiéru, tloušťka < 1 mm

Vzorek E

- jednovrstvá lisovaná deska z lněného pazdeří – pravděpodobně typ Lenex, jednotlivé třísky spojovány močovino-formaldehydovou pryskyřicí, hydrofobizace pazdeří parafínovým nástřikem, tloušťka cca 18 mm
- povrchová vrstva: bílá fólie oboustranně laminovaná do melaminové transparentní pryskyřice; tloušťka < 1 mm



vzorek A



vzorek C



vzorek D



vzorek E

Poznámka: fotografie pro vzorek B chybí; vzorky C a E opatřeny tapetou

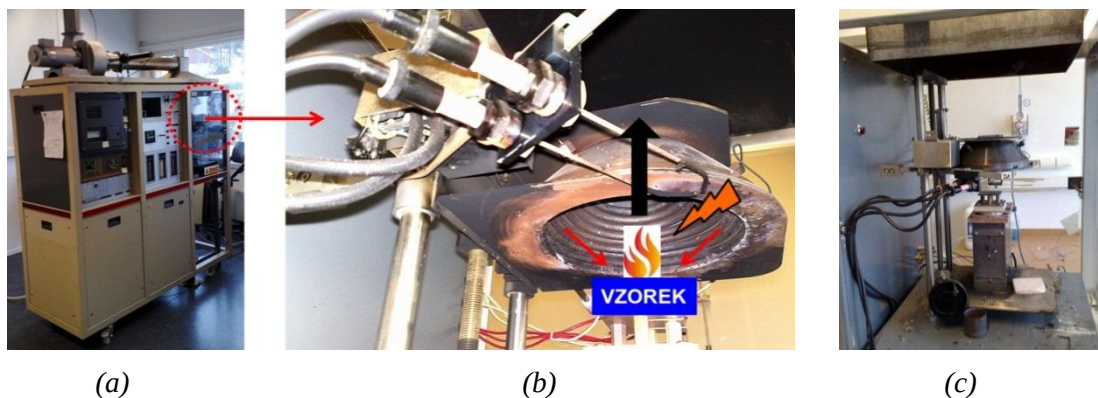
Obr. 4.7 Fotografie z demontáže jader při rekonstrukcích bytových jednotek

4.3.2 Metoda měření – kónický kalorimetr

Kónický kalorimetr je jedním z nejvýznamnějších přístrojů pro **malorozměrové požární testování**, jelikož stanovuje důležité požární vlastnosti materiálů a výrobků v různých přednastavených okrajových podmínkách. Výsledky měření mohou být dále použity jako vstupní data pro výpočetní korelace nebo matematické modely používané k predikci rozvoje požáru. Pro zkušební vzorek lze přímo měřit následující veličiny:

- rychlost uvolňování tepla a kouře;
- celkové uvolněné teplo;

- okamžik vzplanutí;
- efektivní výhřevnost;
- úbytek hmotnosti;
- kritický tepelný tok pro vzplanutí;
- analýza koncentrace kyslíku (O_2), oxidů uhlíku (CO , CO_2) apod.



Obr. 4.8 *Kónický kalorimetr použitý pro testování vzorků bytových jader: (a) celkový pohled s vyznačenou testovací komorou; (b) spodní pohled na kónický zářič; (c) pohled na testovací komoru pod odsávacím plechovým zvonem*

Kónický kalorimetr standardně testuje **vzorky s rozměry $100 \times 100 \text{ mm}$ o tloušťce do 50 mm** s možností horizontální nebo vertikální orientace. Vzorek je umístěn v testovací komoře pod **zářič ve tvaru komolého kužele s tepelným výkonem až 100 kW/m^2** . Sálavý tepelný tok způsobuje tepelnou dekompozici (rozklad) hořlavého povrchu zkušební vzorku a uvolňované plyny jsou v periodickém časovém intervalu **vystaveny iniciačnímu jiskrovému zdroji**, dokud nedojde ke vzplanutí vzorku (Obr. 4.8). Vzorek je umístěn na elektronických vahách pro možnost **sledování úbytku hmotnosti v čase**. Zplodiny hoření z testovaného vzorku prochází skrz shora otevřený kónický zářič do odtahového zvonu (digestoře) a dále do potrubí, kde jsou **zplodiny analyzovány** z hlediska koncentrace kyslíku a oxidů uhlíku (CO , CO_2). V poslední etapě je znečištěný vzduch filtrován. Měřeny jsou rovněž veličiny jako rychlost proudění, teploty nebo sálavý tepelný tok, kterému je vzorek vystaven. Součástí přístroje je i měřicí ústředna pro sběr dat a řídicí průmyslový počítač s ovládacím softwarem.

Vlastní měření na představených vzorcích bytových jader je provedeno stejně jako experiment 1 v rámci doktorské zahraniční stáže v požárnětechnické laboratoři na Stord-Haugesundské univerzitě v Norsku (09/2009–02/2010). Použit je **kónický kalorimetr od společnosti FTT** s možností měření dle ISO 5660 a ASTM E 1354 (FTT, 2012).

4.3.3 Výsledky kónické kalorimetrie

Pro každou z 5 sad vzorků s označením A až E jsou testovány tři reprezentativní kusy pro dvě různě zvolené úrovně tepelného namáhání, a to 25 a 50 kW/m^2 . Úrovně namáhání jsou zvoleny s ohledem na možný rozvoj bytového požáru, kdy se teploty v horní zakouřené části místnosti při dosažení flashover efektu pohybují okolo $500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$ (více kapitola 2.2.1). Zjednodušeně lze z rovnice (2.5) pro teplotu cca $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (823 K), pro jednotkovou emisivitu a

polohový faktor spočítat hustotu dopadajícího tepelného toku na povrch bytového jádra následovně:

$$q''_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot T^4 = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 823^4 = 26\,012 \text{ W/m}^2 \approx 26 \text{ kW/m}^2$$

Nižší úroveň tepelného namáhání (25 kW/m^2) je tedy zvolena ve fázi před flashover efektem, vyšší úroveň namáhání (50 kW/m^2) pak ve fázi po flashover. **Sledováno a graficky zpracováno (viz Příloha 1) je 5 následujících požárnětechnických veličin:**

- Rychlost uvolňování tepla z jednotky plochy;
- Úbytek hmotnosti;
- Vydatnost oxidu uhelnatého;
- Vydatnost oxidu uhličitého;
- Celkové uvolněné teplo.

Rychlost uvolňování tepla z jednotky plochy (Příloha 1, první řada grafů)

Tato sledovaná veličina je v grafech vyjádřena hodnotou HRRPUA (Heat Release Rate per Unit Area) v jednotkách kW/m^2 . Jedná se prakticky o nejnázornější ukazatel vyjadřující, v jaké míře a v jakém časovém okamžiku by jednotlivé vzorky bytových jader mohly přispívat k rozvoji reálných požárů. Všechny sledované vzorky bytových jader mají sendvičový charakter s tenkovrstvou povrchovou vrstvou z umakartu nebo probarvené fólie oboustranně laminované do melaminové pryskyřice. Ve všech grafech je patrný nejprve dramatický prvotní nárůst uvolněného tepla z tenké hořlavé povrchové vrstvy a jeho následný pokles vlivem postupného odhoření a uhelnatění povrchu. V další fázi začíná postupně hořet vnitřní vrstva vzorku (např. pěnový polystyren, lehčené PVC nebo tvrzené desky) a uvolňované teplo se opět zvyšuje, avšak většinou již pozvolněji. Při vyšší úrovni tepelného namáhání (50 kW/m^2) nastává vzplanutí a prudký prvotní nárůst uvolněného tepla velice rychle, a to již během 1 minuty nebo dokonce i 0,5 minuty. Při nižší úrovni namáhání (25 kW/m^2) je doba do vzplanutí vzorků delší a pohybuje se v rozmezí 1–6 minut.

Úbytek hmotnosti (Příloha 1, druhá řada grafů)

Úbytek hmotnosti v grafech je měřen na vahách integrovaných v kónickém kalorimetru pod zkušební vzorkem. V čase nula je možné odečíst počáteční hmotnost vzorku, která je v průběhu tepelné expozice redukována na konečnou hmotnost nespálených zuhelnatělých částí. Časový průběh pro všechny sledované vzorky má přibližně lineární charakter úbytku hmotnosti a vliv dvoustupňového uvolňování tepla popsany v předchozím odstavci se téměř neprojevuje.

Vydatnost oxidu uhelnatého a uhličitého (Příloha 1, třetí a čtvrtá řada grafů)

Vydatnost je vyjadřována v jednotkách kg/kg a jedná se o poměr hmotnosti oxidů uhlíku v odsávaných zplodinách a hmotnosti vzorku. Vydatnost pro oxid uhelnatý (CO) se pro všechny vzorky pohybuje v rozmezí 0–0,5 kg/kg , v určitých fázích například u vzorku A až 1 kg/kg , ojediněle pak v hodnotách vyšších (2–3 kg/kg). Vydatnost oxidu uhličitého (CO₂) se pohybuje v o řád vyšších hodnotách, a to v rozmezí 2–5 kg/kg , ojediněle pak v hodnotách ještě vyšších (10–15 kg/kg). V počáteční fázi je vydatnost CO i CO₂ nízká, výrazněji pak stoupá většinou v druhé polovině nebo až v závěrečné fázi měření. Například vydatnost 3 kg/kg pro CO₂ znamená, že vzorek při vysokoteplotním namáhání vyprodukuje 3 kg CO₂ na 1 kilogram hmotnosti paliva (vzorku). Skutečnost, že hmotnost uvolněných zplodin může být vyšší než

hmotnost samotného vzorku, je dána vázáním vzdušného kyslíku na uhlík uvolňovaný při pyrolýze povrchu.

Celkové uvolněné teplo (Příloha 1, pátá řada grafů)

Tato sledovaná veličina je v grafech vyjádřena hodnotou THR (Total Heat Release) v jednotkách MJ/m². Na rozdíl od rychlosti uvolňovaného tepla (HRRPUA) má THR stále rostoucí charakter, vyjadřuje celkový „tepelný obsah“ uvolněný ze vzorku, a nemůže tudíž docházet k poklesu této sledované veličiny. Pokud zkoušený vzorek v určitých fázích přestává uvolňovat teplo, křivka THR v grafu začíná mít vodorovný charakter. Podobně jako u úbytku hmotnosti vzorku má průběh THR přibližně lineárně rostoucí, v určitých fázích pak mírně logaritmický charakter. THR se na konci měření pohybuje pro vzorek A na úrovni cca 100 MJ/m², vzorek B a C až cca 65 MJ/m², vzorek D cca 100–120 MJ/m² a vzorek E až 180 MJ/m².

4.4 Závěr

Hořlavá bytová jádra v systému lehké prefabrikace vyráběná a montovaná do panelových domů v 60., 70. a 80. letech představují vysoké riziko z hlediska rychlého rozvoje požáru v bytě. V současné době je stále velké množství bytových jader nesanovaných nebo sanovaných takovým způsobem, že provedené úpravy požární riziko ještě zvyšují (např. hořlavé obklady nebo podhledy využívající stávajícího jádra jako nosiče). Přímá návaznost stěnových panelů bytového jádra na instalační šachtu a nedostatečná požární odolnost betonových stropních přepážek v šachtách přímo předurčuje tuto kombinaci k vertikálnímu přeskoku případného požáru do vyšších podlaží nebo na konstrukci střechy. Obdobně slabým článkem v požární bezpečnosti panelových bytových domů jsou stávající elektroinstalační šachty vedené po celé výšce objektu ve schodišťovém prostoru, který bývá téměř vždy jedinou únikovou možností z domu. Původní rozvody s hliníkovými vodiči náchylné ke zkratu, vysoce hořlavé kabelové izolace z měkčeného PVC a nedostatečně těsné plechové opláštění šachet mohou v případě požáru blokovat evakuaci osob z objektu a ztěžovat zásah požárních jednotek. Tato opláštění stávajících bytových a elektroinstalačních šachet představují specifické konstrukční řešení platné době svého vzniku, na které je nutné nahlížet s jistou retrospektivou a nikoliv z hlediska soudobé požární legislativy. Lze konstatovat, že jedinou reálnou možností sanace zlepšující požární stav těchto šachet, a tím do velké míry i panelové bytové výstavby, je jejich demontáž a realizace nových požárněodolných šachet, ať již vyzdívaných nebo kostrových s nehořlavým deskovým opláštěním a dále důsledná oprava betonových stropních přepážek. Samozřejmostí pak jsou související požárně kompletační prvky jako osazení požárních revizních dvířek nebo správné požární dotěsnění instalačních prostupů na hranici požárních úseků včetně střechy.

V rámci této kapitoly jsou poskytnuta požárnětechnická data k pěti různým vzorkům stěnových panelů (příček) hořlavých bytových jader. Vzorky, které byly při rekonstrukcích bytových jednotek vyhodnoceny jako požárněrizikové, byly ihned odebrány a následně podrobeny vysokoteplotnímu namáhání v kónickém kalorimetru pro dvě zvolené úrovně teplotního namáhání (25 a 50 kW/m²). Graficky zpracovány jsou pak v Příloze 1 rychlost uvolňování tepla, úbytek hmotnosti, vydatnost oxidů uhlíku (CO, CO₂) a celkové uvolněné teplo. Výsledky původně zamýšlené po požární CFD simulace nakonec pro tento účel využity nebyly, ale v práci jsou přesto prezentovány zejména s ohledem na nedostupnost dat podobného charakteru v odborné literatuře. Výsledky mohou částečně sloužit i jako podklad při zjišťování příčin požárů nebo při rekonstrukcích požárů v panelových objektech.

Kapitola 5:

Závěry a doporučení

Závěr disertační práce je rozdělen do třech samostatných částí (podkapitol). Nejprve jsou pro potřeby stavební praxe uvedeny specifické konstrukční problémy a doporučení z hlediska požární bezpečnosti instalačních šachet. V druhé části následuje rámcové shrnutí poznatků z experimentálních částí, zejména upozornění na problematická úskalí provedených požárních simulací. V poslední třetí části jsou uvedeny náměty pro další související činnost.

5.1 Závěry pro konstrukční řešení instalačních šachet

Šachty s instalačními rozvody dnes nejčastěji na bázi plastů (potrubí, kabely) představují v budovách při chybném konstrukčním řešení **vysoké riziko vertikálního šíření požáru a toxických zplodin hoření**, a to zejména s ohledem na vysoké požární zatížení nacházející se na malé půdorysné ploše v šachtovém prostoru komínového charakteru. **Bytové instalační šachty** a šachty s technickými instalacemi obecně propojují po celé výšce domu převážně soukromé prostory a mívají přímou návaznost na hořlavou konstrukci střechy. **Elektroinstalační šachty** naopak mají přímou návaznost na společné části domů (chodby, schodiště), které jsou v případě bytových staveb navíc často jedinou únikovou možností. U bytových šachet bývají příčiny požáru častěji mimo šachtu (např. v kuchyni), u šachet elektroinstalačních naopak uvnitř (např. zkrat). V patě obou typů šachet v moderních stavbách ústí často instalační rozvody do hromadných podzemních garáží, které skýtají další rizika v podobě hořících automobilů nebo objektových elektrorozvaděčů (Obr. 5.1 (a), (c)). Zcela specifický problém představuje panelová výstavba bytových domů z druhé poloviny 20. století. Hořlavá bytová jádra s návazností na instalační šachty a elektroinstalační šachty s netěsnými plechovými pláště samostatně analyzuje Kapitola 4 včetně samostatného závěru.



Obr. 5.1 Bytový dům (Praha Kbely, 2010): (a) prostupy instalačních rozvodů z hromadných garáží do bytových šachet; (b) plastová revizní dvířka v navazující bytové šachtě (požadováno EW 15 DP1; po opravě viz Obr. 2.22 (b)); (c) objektový elektrorozvaděč v garážích a chybně těsněný prostup kabelů v požárním stropě přímo nad rozvaděčem (viz Obr. 2.14(b)); (d) navazující elektroinstalační šachta ve vyšších podlažích na nevětrané nechráněné únikové cestě (chodba) s dveřmi zcela bez požární odolnosti (požadováno EW 15 DP2); (e) chybně osazené požární dveře (EW 30 DP3) do průběžné elektroinstalační šachty na chráněné únikové cestě (požadováno EI 15 DP1-S, tj. kovové, kouřotěsné)

Instalační šachty mohou být z požárního hlediska řešeny ve třech základních konstrukčních variantách, a to jako průběžná, horizontálně členěná a kombinovaná šachta. **Průběžná šachta** vytvářející samostatný požární úsek je od okolních prostor oddělena svislou šachtovou

požárněodolnou stěnou, ve které jsou revizní dvířka řešena jako požární uzávěry a prostupující instalace požárně utěsněny. Případné stropní přepážky uvnitř šachty jsou bez požárních požadavků. **Členěná šachta** je opatřena horizontálními požárními přepážkami v úrovni stropů s požárně utěsněnými instalačními prostupy a šachtový prostor se tak stává součástí požárního úseku, kterým prochází. **Kombinovaná šachta** je požárně oddělena jak ve svislém směru tak vodorovném směru a vytváří v každém podlaží samostatný požární úsek, tj. kombinuje oba předchozí konstrukční principy a využívána je zejména pro elektroinstalační šachty. Členěná a kombinovaná šachta ve své podstatě šachtou není, ale chybné konstrukční řešení stropních přepážek jim v případě požáru velice rychle vrací šachtový (komínový) charakter. Společným a častým problémem všech typů šachet jsou chybně požárně utěsněné instalační prostupy, pro které **disertační práce zavádí pojem požární most**, zcela obdobně jako je tomu ve stavební fyzice u mostů tepelných, vlhkostních nebo akustických. Požárním utěsněním může být v některých případech pouze pečlivé vyplnění mezer mezi instalací a požárně dělicí konstrukcí (stěnou, stropem) nehořlavou hmotou, ale častěji jde o tzv. **požární ucpávky**, tj. systémy fungující na intumescentním (pěnicím) principu. Ucpávky jsou systémové výrobky vyžadující odbornou montáž, značení (štítkování) a každoroční revize, což bývá ve stavební praxi předmětem velmi častých problémů.

Na základě praktických zkušeností autora lze konstatovat následující specifické poznatky, které mohou pomoci pro kvalitnější **zajištění pasivní (konstrukční) požární ochrany šachet**.

- Pro bytové i elektroinstalační šachty je z požárního hlediska vhodné navrhovat **průběžné šachty**, tj. oddělit šachtu a okolní prostor ve svislém směru, a v úrovni stropů **doplňovat šachty betonovými „nepožárními“ přepážkami**. Instalační prostupy přepážkou tak není nutné požárně těsnit a přepážka plní zejména funkci akustickou a hygienickou (šíření oděrů). Přepážka nevytváří požárně dělicí konstrukci, ale může brzdit případné šíření požáru.
- Horizontálně členěná a kombinovaná šachta s požárními přepážkami představuje velký problém zejména pro **nepřístupnost** v případě oprav a každoročních revizí ucpávek. Betonové přepážky musí mít pro ucpávky obvykle konstrukční tloušťku nejméně 150 mm, v menších tloušťkách nelze ucpávku realizovat.
- Jsou-li při výměně instalací dotčeny požární **přepážky bytové šachty v panelovém domě**, musí být nejen pečlivě dobetonovány, ale zajištěna jejich požadovaná požární odolnost nejméně **EI 30 DP1** s požárně utěsněnými prostupy (např. manžeta u kanalizačního potrubí).
- Sdružený prostup s využitím měkké deskové ucpávky (Obr. 2.16 (a)) není vhodné navrhovat jako dno šachty, pod kterým se nachází hlučný provoz (např. garáže). Přepážka může působit jako **rezonující membrána** a působit akustické problémy v navazujících chráněných prostorech (bytech).
- Šachtové stěny (s požadavkem na požární odolnost) jsou často vyzdívány z keramických dutinových bloků (příčkovek) typu THERM, avšak požární odolnost bývá výrobcí deklarována s oboustrannou omítkou. Vnitřní omítky v šachtě je v podstatě nereálnou záležitostí a bez její realizace se jedná o chybnou aplikaci. Nezbytné je navrhovat **příčkové zdivo s požární odolností deklarovanou bez omítek** (nejčastěji pórobetonové).
- Mezeru mezi požárněodolnou šachtovou stěnou (zejména vyzdívanou) a stropní konstrukcí, stejně tak jakékoliv jiné otvory a netěsnosti v požárně dělicích konstrukcích je **nepřípustné těsnit jakýmkoliv požárně „necertifikovaným“ hořlavým materiálem** (např. montážní polyuretanovou pěnou).

- Pro systémové ucpávky prováděné v šachtách nebo místech jinak obtížně přístupných nebo skrytých je nezbytné od montážní firmy vyžadovat **kvalitní pasport** pro možnost revize. Typickým místem bývá v podhledu skrytý prostup kabelového svazku šachtovou stěnou do společných částí domu, kde je následný podstropní rozvod rovněž zakryt podhledem.
- Z hlediska vzduchotěsnosti v pasivních bytových domech mohou představovat měkké požární ucpávky v šachtách **nežádoucí průvzdušnost**. Z požárního hlediska jsou vhodnější průběžné šachty s betonovými (nepožárními) přepážkami, ve kterých pak lze ze spodní strany provést na instalačních prostupech vzduchotěsné oblepy.
- Zejména pro členěné a kombinované šachty je nezbytné **navrhovat co největší velikost revizních dvířek a co nejblíže stropní přepážce**, nejlépe v šířce odpovídající šířce šachty. Standardní rozměr dvířek (např. 30 × 40 cm, viz Obr. 5.1(b)) uprostřed výšky šachtové stěny je sice dostatečný pro přístup k uzávěrům nebo vodoměrům, ale již zcela nedostatečný pro opravy ucpávek nebo vzduchotěsných oblepů v nepřístupných stropních přepážkách.
- **Kombinované elektroinstalační šachty nejsou vhodné** konstrukční řešení, pokud ústí do chráněných únikových cest. Navrhují se zejména z důvodu nižších požadavků na požární revizní uzávěry (Obr. 5.1 (e)) a nezbytnou podmínkou je spolehlivá požární přepážka v úrovni stropu. Je-li po dokončení stavby zjištěno chybné provedení nebo poškození již nepřístupné přepážky, požární uzávěr se stává nevyhovujícím.
- **Větrací nebo světlikové šachty** zejména ve starších objektech nesmí být využity pro vedení instalací technického charakteru. Pouze ve výjimečných a odůvodněných případech lze umístit komínové těleso odpovídající normových požadavkům (Vyhláška č. 268 Sb., 2009).
- U všech typů instalačních šachet je nezbytná maximálně možná pečlivost při požárním **utěsnění instalačních prostupů hořlavým střešním pláštěm**, a to zejména pro odvětrání kanalizačního a vzduchotechnického potrubí. Stejně jako prostup stropní přepážkou, tak i prostup střešním pláštěm v šachtě bývá v nepřístupných místech.

Aktivní požární ochrana šachet se uplatňuje ve výjimečných případech a může se jednat hlavně o stabilní hasicí zařízení řízená elektrickou požární signalizací, případně o autonomní (nezávislé) hasicí systémy či zařízení pro odvod kouře a tepla. Vhodná jsou zejména hasiva s objemovým účinkem hašení, a to například aerosolová, mlhová nebo plynová hasicí zařízení.

5.2 Závěry pro experimentální část

Disertační práce prezentuje dvě samostatné experimentální části, a to šachtový experiment (Kapitola 3) a výsledky konické kalorimetrie vzorků hořlavých bytových jader z panelových bytových domů (Kapitola 4). **Oba experimenty mají své podrobné závěry v příslušných kapitolách.**

5.2.1 Šachtový experiment

Zónové modely, běžně dnes využívané v projekční praxi, **nejsou použitelné pro simulace účinků požáru v prostorech s jedním převládajícím rozměrem** (např. šachty, tunely, instalační kanály, chodby). Pro tento účel je vhodné využít požární modely typu pole, častěji označované jako CFD modely.

Experiment analyzuje účinky řízeného požáru v laboratorním modelu šachty a porovnává je s výsledky matematického CFD modelu, tj. s počítačovou simulací ve stále častěji využívaném programu FDS. Validační zkoušky softwaru, tj. ověření míry shody mezi počítačovou predikcí a experimentálně získanými výsledky, jsou obecně v praxi realizovány v prostorech objemového charakteru (místnosti). Výsledky z úzkého a vysokého prostoru, jakými šachty jsou, tak poskytují zajímavá data validačního charakteru. Mezi laboratorním a CFD modelem byla předem očekávána jistá úroveň neshody daná dynamikou požáru ve specifickém prostoru komínového charakteru – šachtě.

Průběh experimentu je rozdělen na tři různé fáze s ohledem na základní konstrukční řešení instalačních šachet z požárního hlediska, tj. průběžná a členěná šachta.

Fáze experimentu 1 představuje průběžnou šachtu se zcela nehořlavým opláštěním, ve které jsou od účinků řízeného požáru (20 kW plynový hořák) sledovány teploty, rychlosti proudění a dopadající tepelný tok. Lze konstatovat následující závěry:

- **Velice dobrá shoda teplot** mimo oblast sloupce horkých plynů nad hořákem (fire plume) pohybující se do 20 %; velké teplotní fluktuace v oblasti fire plume. V porovnání s laboratorním měřením má simulace s hrubší výpočetní sítí tendenci predikovat vyšší teploty, jemnější síť (poloviční velikost buněk) pak výpočet zpřesňuje, ale i značně prodlužuje.
- **Výrazná neshoda tepelného toku** dopadajícího z plynového hořáku na zadní šachtovou stěnu. Laboratorně měřené hodnoty jsou 2–4× nižší než hodnoty simulované.
- **Výborná shoda rychlostí proudění** vzduchu pro jemnější výpočetní síť. Výpočetní síť hrubší predikuje o cca 25 % nižší rychlosti proudění.

Fáze experimentu 2 je modifikací modelu průběžné šachty, a to za účelem analýzy šíření plamene po hořlavém povrchu šachtových stěn z průhledného plastu – polymethylmetakrylátu (PMMA – desky z plexiskla tl. 10 mm). Experiment je proveden ve dvou variantách A, B. Ve variantě A je deska z PMMA umístěna místo přední šachtové stěny, ve variantě B i jako vnitřní obklad jedné boční šachtové stěny. Řízený zdroj požáru (plynový hořák s menším tepelným výkonem 6kW) je využit jako iniciační zdroj zapálení, po určité době je vypnut a sledován samovolný rozvoj požáru uvnitř šachty. Lze konstatovat následující závěry:

- Na začátku simulace, kdy ještě nehoří deska z PMMA, lze pozorovat až **2× větší výšku plamene** než v laboratorních podmínkách.
- **Rozvoj požáru v šachtě a šíření plamene po hořlavém opláštění** je v simulaci výrazně rychlejší a intenzivnější než v laboratorních podmínkách. Rychlost vertikálního rozvoje požáru u varianty B je přibližně 2× vyšší než u varianty A.
- **V laboratorním modelu** u varianty A i B dochází po vypnutí hořáku k plynulému vertikálnímu šíření plamene po povrchu desek PMMA a na konci testu **hoří desky souvisle po celé své výšce**. V simulaci po vypnutí hořáku je **teprve výrazně zjemněná výpočetní síť schopná povrch nejen zapálit, ale i plamen na povrchu hořlavého opláštění déle udržet**. U varianty A po určité době i tak dochází k vyhasnutí plamene na povrchu, u varianty B je naopak simulovaný rozvoj tak dramatický, že hoří přední i boční stěna v celé své ploše a dochází k velice zdoluhavým a následně i numericky nestabilním výpočtům.

Fáze experimentu 3 představuje horizontálně členěnou šachtu s nehořlavým opláštěním, jejímž cílem je ověření možnosti přeskočení plamene ze dna šachty (20 kW plynový hořák) přes kumulující se vrstvu kouře v šachtě nad stropní přepážku. V betonové stropní přepážce je

vytvořen otvor představující netěsnost po případném odhoření instalací z plastu. Tento otvor je ze své původní velikosti postupně redukován na 50, 25 a 12,5 % a sledován přechod mezi požárem řízeným palivem (plynem v hořáku) k požáru řízenému odvětráním (nedostatkem kyslíku pro spalování). Sledováno je tak riziko přeskočení plamene mezi podlažími. Lze konstatovat následující závěry:

- ***V laboratorním modelu šachty není pozorován žádný přeskok ani tendence k prošlehnutí*** plamene z úrovně hořáku nad stropní přepážku. Naopak jak pro hrubší tak jemnější výpočetní síť ***v simulaci dochází nejen prošlehávání plamene*** při otevření přepážky 25 %, ***ale dokonce k trvalému plamennému hoření nad přepážkou*** při otevření 12,5 %.
- Teploty měřené i simulované v těsné blízkosti nad přepážkou (maximálně okolo 400 °C) nedosahují hodnot pro vzplanutí kouřové vrstvy (500 – 600 °C) a ***nemělo by tudíž vůbec docházet k hoření nad přepážkou***. V laboratorním modelu při nejmenším otevření otvoru v přepážce (12,5 %) teploty výrazně klesají a vnitřní požár (výkon hořáku) začíná být řízen odvětráním kvůli nedostatku kyslíku pro spalování plynu, zatímco neměnný tepelný výkon hořáku a rostoucí teploty v CFD simulaci představují stále požár řízený palivem.

V souhrnu lze konstatovat, že simulace řízeného požáru v modelu šachty v programu FDS vykazují velice dobrou shodu s provedeným experimentem zejména pro teploty a rychlosti proudění při požáru řízeném palivem s dostatkem kyslíku pro spalování. Simulace dopadajícího tepelného toku vykazují vyšší míru neshody. Submodel hoření integrovaný v programu FDS se snaží matematicky simulovat velice náročný jev, jakým je pyrolýza pevné fáze hořlavého povrchu z PMMA a následné hoření plynné fáze. Provedený experiment pro jednoduché okrajové podmínky sice prokazuje schopnost simulovat zapálení a rozvoj požáru po hořlavém povrchu, ale v porovnání s laboratorním měřením je zjištěna tendenční neshoda. Simulace buď výrazně podhodnocuje, nebo nadhodnocuje rozvoj požáru v šachtě, a navíc se často jedná se o výpočty velmi zdoluhavé (v řádech dnů i týdnů) a náročné z hlediska znalostí vstupních materiálových charakteristik. Pro simulace rozvoje požáru v programu FDS u reálných staveb se jeví jako racionálnější definovat požár s využitím předem známé rychlosti uvolňovaného tepla nebo využít empirické vztahy (např. t-kvadratické požáry, viz Kapitola 2.5.5). Simulace rozvoje požáru s využitím submodelu hoření stále patří do oblasti výzkumu a vývoje. U členěné šachty má simulovaný plamen nejprve tendenci přeskokovat do kouřové vrstvy kumulované pod stropní přepážkou, později dokonce dochází k trvalému plamennému hoření nad otvorem v přepážce. V laboratorním modelu tento jev nebyl pozorován. V reálných chybně řešených šachách však k přeskočení požáru mezi přepážkami může dojít, a to zejména kvůli vysoké koncentraci hořlavých plastů v šachtě s výrazným vývojem kouře.

5.2.2 Kalorimetrické zkoušky bytových jader

Disertační práce poskytuje ***požárnětechnické charakteristiky pro 5 různým vzorků stěnových panelů (příček) hořlavých bytových jader*** odebraných během rekonstrukcí. Pro vzorky vysokoteplotně testované v konickém kalorimetru jsou v Příloze 1 graficky zpracovány rychlost uvolňování tepla, úbytek hmotnosti, vydatnost oxidů uhlíku (CO, CO₂) a celkové uvolněné teplo. Výsledky původně zamýšlené po požární CFD simulace nakonec pro tento účel využity nebyly, ale v práci jsou přesto prezentovány zejména s ohledem na nedostupnost dat podobného charakteru v odborné literatuře. Výsledky mohou částečně sloužit i jako podklad při zjišťování příčin požárů nebo při rekonstrukcích požárů v panelových objektech.

5.3 Náměty pro další práci

Náměty pro další práci autor spatřuje především v principech optimalizace CFD výpočtů. Jednou z hlavních nevýhod požárních CFD simulací je jejich časová náročnost. Podrobné výpočty mohou v případě reálných staveb trvat extrémně dlouho, tj. v řádu několika dnů nebo dokonce i týdnů. Je-li simulace prováděna ve variantách (např. pro různé požární scénáře) nebo je jen průběžně zpřesňována, pak opakující se výpočty mohou znamenat časově neudržitelný stav. **Kombinace požárních simulací ve 3D a 1D může představovat efektivní úsporu času** a již se tímto postupem začínají zabývat některá vědecká pracoviště (Colella, Rein, Verda, & Borchiellini, 2011). Například u simulací v prostorech s jedním převládajícím rozměrem (tunely, šachty, chodby, kanály) dochází v blízkosti lokálního požáru (např. hořící automobil v tunelu) k dynamicky proměnlivým účinkům, které nejlépe popisuje trojrozměrná simulace (3D). V určité vzdálenosti od lokálního požáru však dochází k určité „homogenizaci“ účinků požáru a zde lze využít jednodušší jednorozměrnou simulaci (1D). Dalším tématem pro úsporu času mohou být tzv. **paralelní výpočty a analýza scalability procesorů**, tj. analýza efektivity více současně počítajících procesorů integrovaných ať již v jednom nebo více počítačích na síti. „N“ současně pracujících procesorů ještě neznamena „N“krát kratší výpočet, jelikož nejrychlejší procesor po vypočtení určitého kvanta dat musí vyčkat na procesory ostatní pro vzájemné předání informací.

Dalším úskalím pro efektivní požární CFD simulace je problematická dostupnost vstupních dat, tj. požárnětechnických charakteristik materiálů. Velice zajímavým tématem je v oblasti požárního modelování **aplikace genetických algoritmů (GA) pro odhad materiálových vlastností** na základě dílčích malorozměrových měření (např. konická kalorimetrie). Tyto principy jsou publikovány (Lautenberger, Rein, & Fernandez-Pello, The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data, 2006) a jsou integrovány do výpočetního programu Gpyro, jakožto výpočetního modelu pro simulace pyrolýzy hořlavých pevných látek (Lautenberger, Gpyro – A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids – Users' Guide – Version 0.700, 2009). Program Gpyro rovněž umožňuje přímé propojení s programem FDS.

Literatura

- Zákon č. 133 Sb. (1985). *O požární ochraně ve znění pozdějších předpisů*.
- ČSN 73 0824. (1992). *Požární bezpečnost staveb – Výhřevnost hořlavých látek*. Praha: Vydavatelství norem.
- ČSN EN 1991-1-2. (2006). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: ČNI.
- Zákon č. 183 Sb. (2006). *O územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)*.
- ČSN EN 14390. (2007). *Požární zkouška – Velkorozměrová požární zkouška výrobků pro povrchové úpravy*. Praha: ÚNMZ.
- Vyhláška č. 23 Sb. (2008). *O technických podmínkách požární ochrany staveb*.
- ČSN 73 0802. (2009). *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*. Praha: ÚNMZ.
- ČSN 73 0810. (2009). *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*. Praha: ÚNMZ.
- Vyhláška č. 268 Sb. (2009). *O technických požadavcích na stavby*.
- ČSN EN 13501-1+A1. (2010). *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Praha: ÚNMZ.
- ČSN 73 0540-2. (2011). *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: ÚNMZ.
- ČSN 73 0834. (2011). *Požární bezpečnost staveb – Změny staveb*. Praha: ÚNMZ.
- Andersson, P., & Wetterlund, P. (2001). Uncertainty in Heat Flux Calibrations Performed According to NT FIRE 050 – Nordtest project No. 1525-01. *SP Report 34*. Borås, Sweden.
- Balog, K., & Kvarčák, M. (1999). *Dynamika požáru*. Ostrava: SPBI.
- Colella, F., Rein, G., Verda, V., & Borchiellini, R. (2011). Time-Dependent Multiscale Simulations of Fire Emergencies in Longitudinally Ventilated Tunnels. *10th International Symposium on Fire Safety Science* (stránky 359-372). Colledge Park, Maryland, USA: c/o Interscience Communications Ltd, London, GB.
- Deibjerg, T., Husted, B. P., Bygbjerg, H., & Westerman, D. (2003). *Argos User's Guided*. Copenhagen: Danish Institute for Fire and Research Technology.
- Drysdale, D. (1998). *An Introduction to Fire Dynamics – Second Edition*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Emmons, H. W., & Tanaka, T. (2008). Vent Flows. V *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th Edition* (stránky 37-53, Section 2). Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Fire-Jack®. (2011). *Samočinné stabilní hasicí zařízení*. Načteno z www.fire-jack.com
- FTT. (2012). *Fire Testing Technology Ltd.*. Získáno 2. únor 2012, z The Benchmark in Fire Testing: www.fire-testing.com/cone-calorimeter-dual
- Holman, J. P. (1997). *Heat Transfer – 8th ed.* USA: McGraw-Hill.

- Hošek, J. (2009). Zjišťování příčin požárů (prezentace). HZS hl. m. Prahy, Odbor zjišťování příčin požárů.
- Intumex®. (2009). *Požární bezpečnost staveb – průvodce*. Načteno z www.intumex.cz
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. Colledge Park, Maryland, USA: CRC Press LLC.
- Klote, J. H., & Milke, J. A. (2002). *Principles of Smoke Managment*. Atlanta: ASHRAE.
- Klote, J., & Forney, G. (1993). *Zone Fire Modelling With Natural Building Flows and a Zero Order Shaft Model; NISTIR 5251*. Gaithersburg, USA.
- Kolektiv autorů. (1998). *Přestavba bytových jader – příručka pro investory, projektanty a dodavatele*. Praha: Svaz českých a moravských bytových družstev.
- Kučera, P., & Pezdová, Z. (2010). *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava: SPBI.
- Kučera, P., Kaiser, R., Pavlík, T., & Pokorný, J. (2008). *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany*. Ostrava: SPBI.
- Kupilík, V. (1975). Písemná práce z kandidátského minima. *Tenkostěnné vrstvené konstrukce na nové materiálně technické základně*.
- Kupilík, V. (2009). *Konstrukce pozemních staveb – Požární bezpečnost staveb*. Praha: ČVUT.
- Lautenberger, C. (2009). *Gpyro – A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids – Users' Guide – Version 0.700*. Berkeley, California, USA: University of California, Department of Engineering.
- Lautenberger, C., Rein, G., & Fernandez-Pello, C. (2006). The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. *Fire Safety Journal* 41, stránky 204-241.
- Masařík, I. (2003). *Plasty a jejich požární nebezpečí*. Ostrava: SPBI.
- McCafferey, B. J., & Heskestad, G. (1976). A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame. *Combustion and Flame* 26, stránky 125-127.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Howard, B., Ronald, R., Wiliam, M., a další. (2007). *Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-5*. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute for Standards and Technology.
- McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., & Floyd, J. (2007). *Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide, NIST Special Publication 1019-5*. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute for Standards and Technology.
- Mleziva, J., & Šňupárek, J. (2000). *Polymery, výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles.
- Novák, J. (2011). Měření vzduchotěsnosti budov. *Dílčí výzkumná zpráva za rok 2011*. Praha: CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí.
- Pokorný, M., Husted, P. B., & Kraaijeveld, A. (2011). Comparison of Shaft Fire Experiment and CFD Modelling. *10th International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 1029-1042). Colledge Park, Maryland, USA: c/o Interscience Communications Ltd, London, GB.

- Promat®. (2011). *Požární bezpečnost staveb dle EN, 4. vydání*. Načteno z www.promatpraha.cz
- SAINT-GOBAIN. (2008). PAM – Kompletní litinový systém pro odvodnění budov. 25 rozhodujících výhod. SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o.
- Särdqvist, S. (1993). *Initial Fires – RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests*. Lund: Lund University, Institute of Technology, Department of Safety Engineering, Sweden.
- Sette, B. J. (2005). Critical Considerations on the Use of a Bi-directional Probe in Heat Release Measurements. *Fire and Materials* 29, stránky 335-349.
- Shannon, K. S., & Butler, B. W. (2003). A Review of Error Associated with Thermocouple Temperature Measurement in Fire Environments. *Second International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress and Fifth Symposium on Fire and Forest Meteorology* (str. 7B.4). Orlando, FL: American Meteorological Society.
- SP. (2003). *The Room Fire* (film). Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institut.
- Šenovský, M., Prokop, P., & Bečák, P. (2007). *Větrání objektů*. Ostrava: SPBI.
- Tewarson, A. (2008). Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fires. V *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (stránky 109-194, Section 3). Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Varri, V., Jaatinen, S., & L., A. (2008). Water Mist Fire Suppression in Cable Tunnels. *Konference Požární ochrana* (stránky 607-618). Ostrava: SPBI.
- Witzany, J., & Kuplík, V. (1997-99). Grant Ministerstva průmyslu a obchodu ČR, PZ S2/04/97 [1697 K 1240]. *Regenerace panelových domů – Požární bezpečnost panelových budov*. Praha: ČVUT – Fakulta stavební.
- Zhang, J. Y., Lu, W. Z., Huo, R., & Feng, R. (2008). A new model for determining neutral-plane position in shaft space of a building under fire situation. *Building and Environment* 43, 1101-1108.

Publikační činnost autora

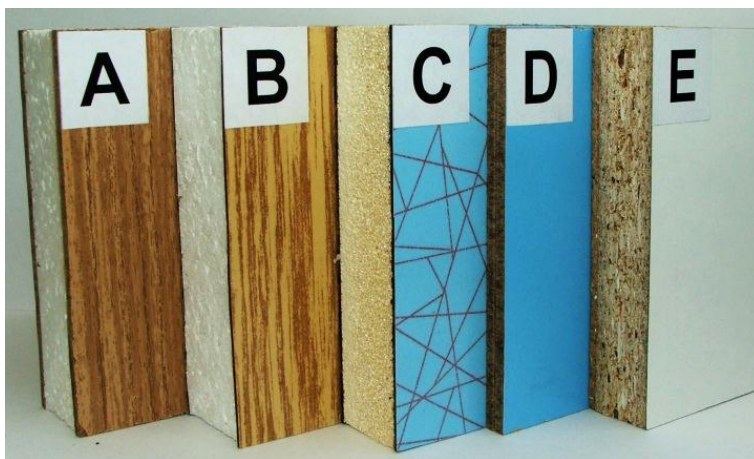
- Kupilík, V., & Pokorný, M. (2008). Těsnění ve zděných konstrukcích z požárního hlediska. *Konference Zděné a smíšené konstrukce* (stránky 143-148). Brno: Česká betonářská společnost.
- Kupilík, V., & Pokorný, M. (2010). All-glass Facades in Fire Conditions from Sustainable Development - point of View. *Konference Central Europe Towards Sustainable Building* (stránky 137-140). Praha: ČVUT – Fakulta stavební.
- Pokorný, M., & Husted, B. P. (2010). Porovnání teplotního pole modelu šachty s plynovým hořákem a matematického CFD modelu. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, Řada bezpečnostní inženýrství*, stránky 71-78.
- Pokorný, M. (2005). Požární těsnění instalací v požárně dělicích konstrukcích. *Konference Požární bezpečnost stavebních objektů* (stránky 75-84). Ostrava: SPBI.
- Pokorný, M. (2005). Sanace bytových jader v panelové výstavbě z požárního hlediska. *Konference Sanace a rekonstrukce staveb* (stránky 261-265). Brno: Česká stavební společnost, WTA CZ.
- Pokorný, M. (2006). Polystyrene foam in the ETICS in terms of fire safety. *Advanced Engineering Design. 5th International Conference AED* (str. P3.17). Praha: ČVUT.
- Pokorný, M. (2007). Limitující faktory pro návrh dřevostaveb z požárního hlediska. *Časopis Tepelná ochrana budov* 2/2007, 7-13.
- Pokorný, M. (2007). Protipožární ochrana kabelových instalací. *Časopis Elektroinstalatér* 6/2007, 10-15.
- Pokorný, M. (2007). Rizika spojená s použitím plastických hmot v instalačních šachtách z požárního hlediska. *Konference Požární ochrana* (stránky 477-486). Ostrava: SPBI.
- Pokorný, M. (2007). Teorie požáru. *Seminář Stavební konstrukce z požárního hlediska dle evropských norem* (stránky 6-22). Praha: ČVUT – Fakulta stavební.
- Pokorný, M. (2008). Pasivní požární ochrana v rámci stávající panelové výstavby. *Seminář Nové systémy v požární ochraně* (stránky 28-48). Praha: ČVUT – Fakulta stavební.
- Pokorný, M. (2009). Požární normy stále přísnější – Závady kontaktních zateplovacích systémů z požárního hlediska. *Časopis Fasády I/duben*, 67-69.
- Pokorný, M. (2009). Šíření požáru instalačními šachtami. *XII. Mezinárodní vědecké konference – sekce Technická zařízení staveb a energie budov* (stránky 25-28). Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební.
- Pokorný, M. (2010). Porovnání teplotního pole modelu šachty s plynovým hořákem a matematického modelu. *Konference Požární ochrana* (stránky 250-253). Ostrava: SPBI.
- Pokorný, M. (2010). Požárněbezpečnostní řešení staveb – elektronické podklady pro výuku. *Konference Požární ochrana* (stránky 380-381). Ostrava: SPBI.
- Pokorný, M. (2010). *Požární bezpečnost staveb – Sylabus pro praktickou výuku*. Praha: ČVUT – Fakulta stavební.

- Pokorný, M., & Šimmer, D. (2007). Základy požární represe. *Seminář Stavební konstrukce z požárního hlediska dle evropských norem* (stránky 94-103). Praha: ČVUT – Fakulta stavební.
- Pokorný, M., Husted, P. B., & Kraaijeveld, A. (2011). Comparison of Shaft Fire Experiment and CFD Modelling. *10th International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 1029-1042). Colledge Park, Maryland, USA: c/o Interscience Communications Ltd, London, GB.
- Růžička, J., & Pokorný, M. (2011). Požární odolnost obvodových stěn NED, PD z přírodních a recyklovaných materiálů. *Časopis Stavebnictví 11-12/11*, 34-39.

Příloha 1:

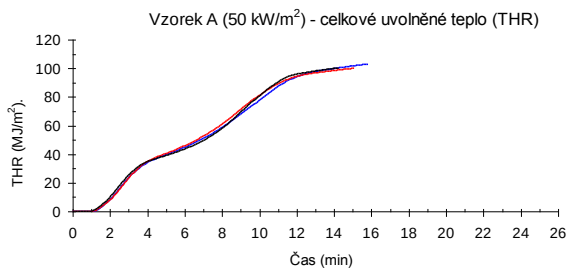
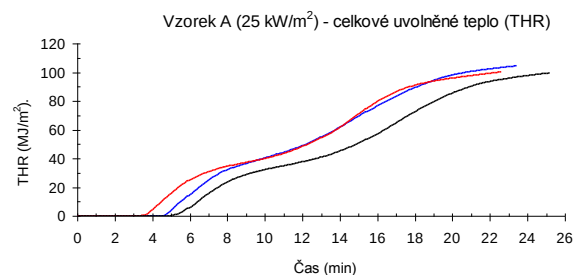
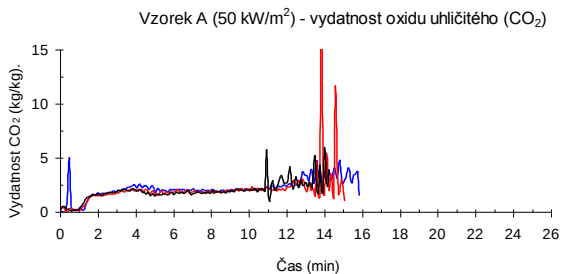
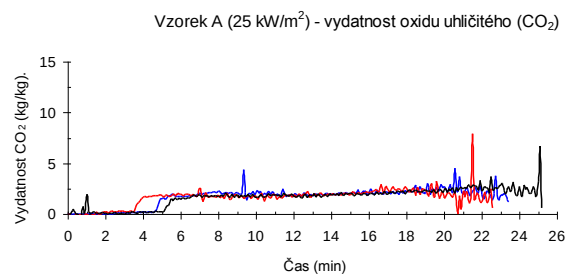
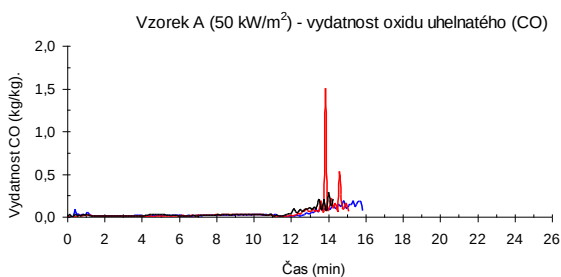
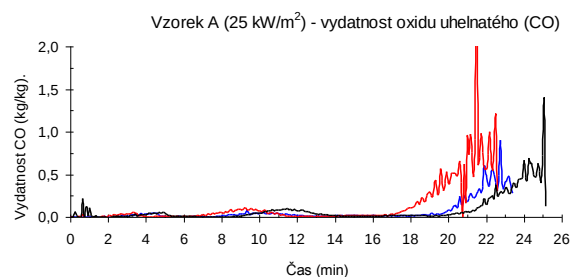
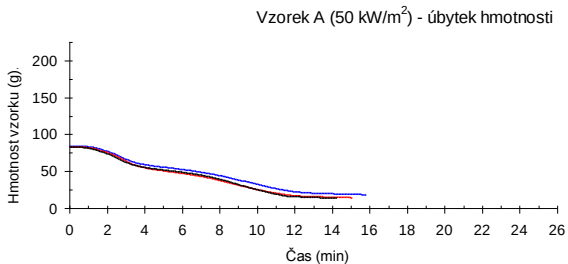
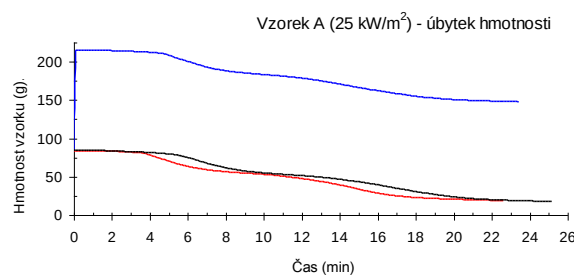
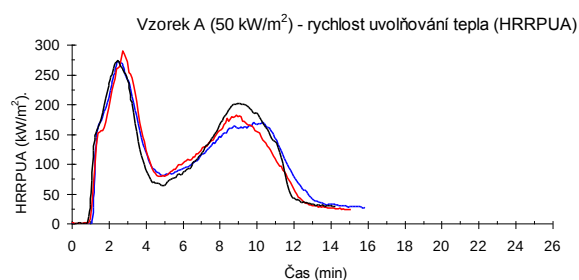
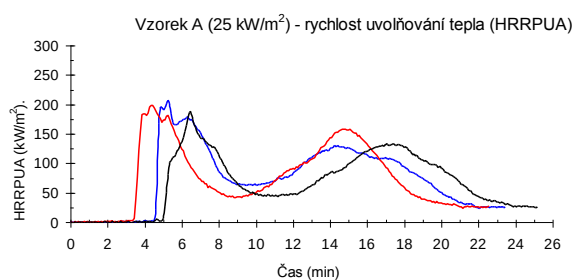
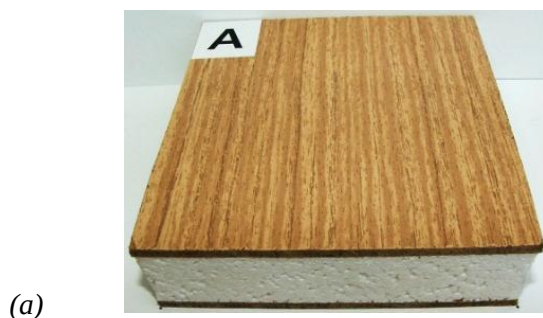
Bytová jádra v systému lehké prefabrikace – data z kónického kalorimetru

- 5 sad vzorků stěnových panelů bytových jader s označením A–E;
- Pro každou sadu testovány 3 ks při tepelné expozici:
 - (a) 25 kW/m²;
 - (b) 50 kW/m²;
- Pro jednotlivé vzorky uvedena detailní fotografie včetně stavu vzorku po ukončení zkoušky s tepelnou expozicí 50 kW/m².

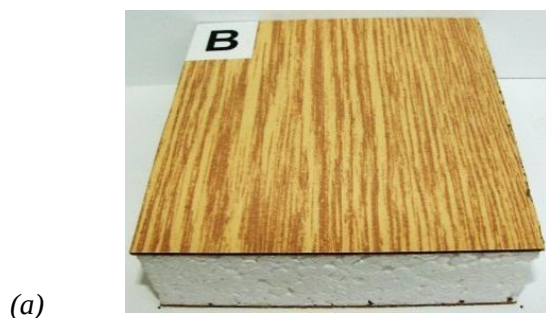


Vzorek	Adresa místa odběru	Datum odběru
A	Amforová 1892/30, Praha 5 – Stodůlky	Květen 2010
B	Ivančická 581, Praha 9 – Letňany	Červen 2010
C	Kaplická 857/39, Praha 4 – Podolí	Duben 2010
D	Nevanova 1074/33, Praha 6 – Řepy	Červen 2010
E	Steinerova 601/18, Praha 4 – Háje	Listopad 2010

Vzorek A



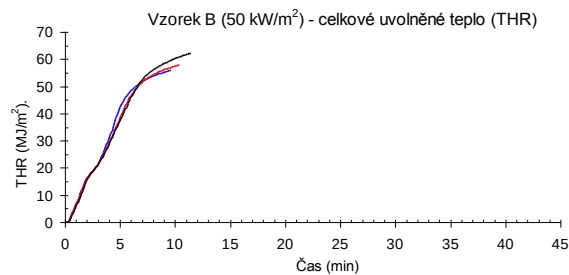
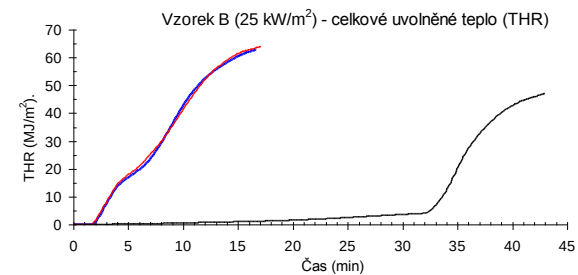
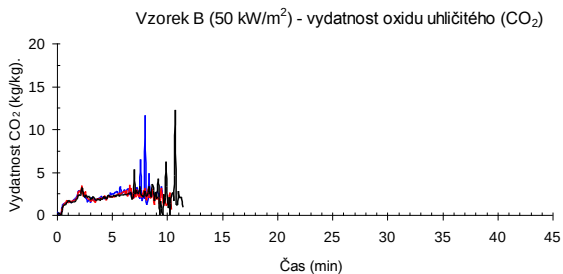
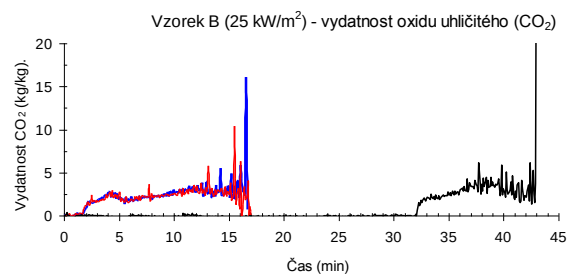
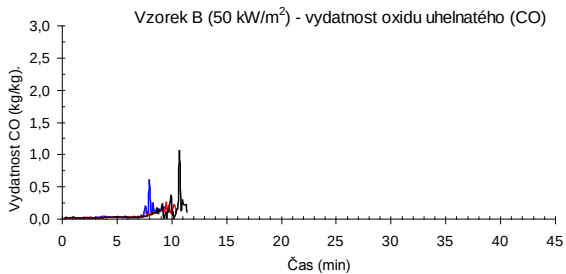
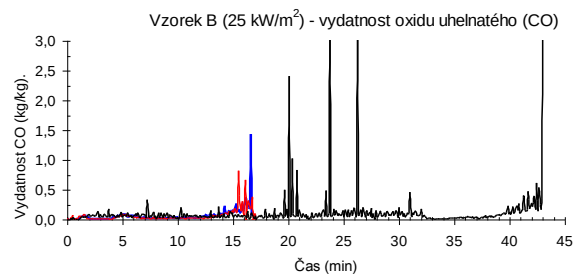
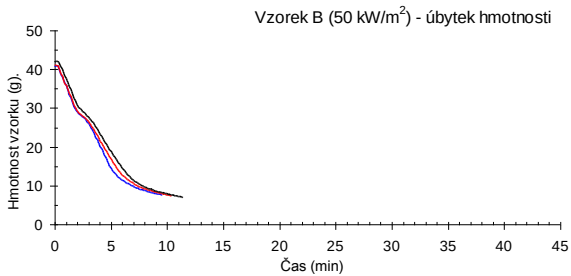
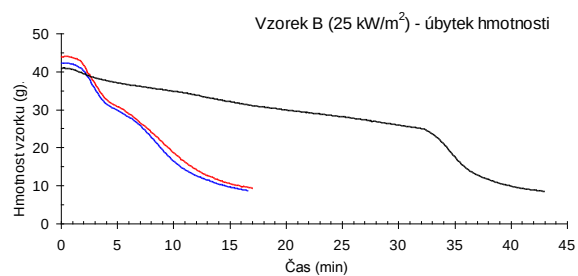
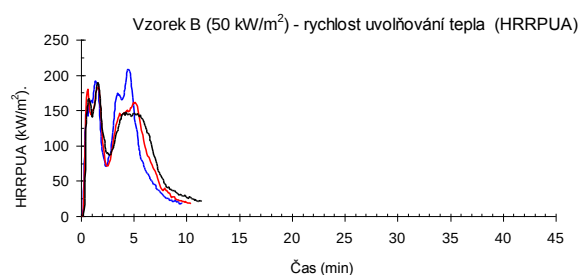
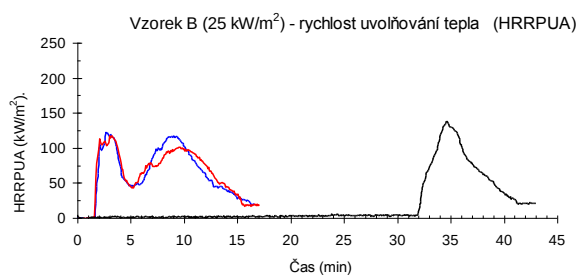
Vzorek B



(a)

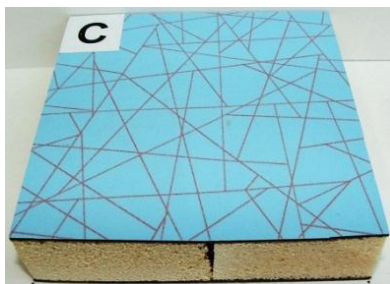


(b)

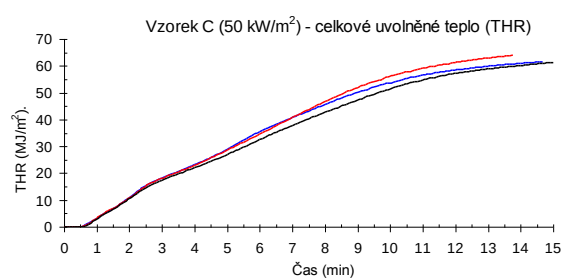
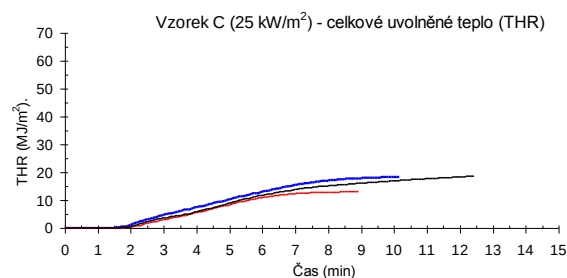
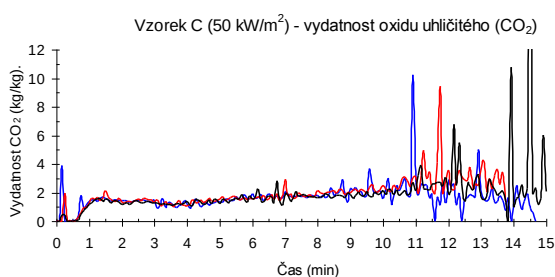
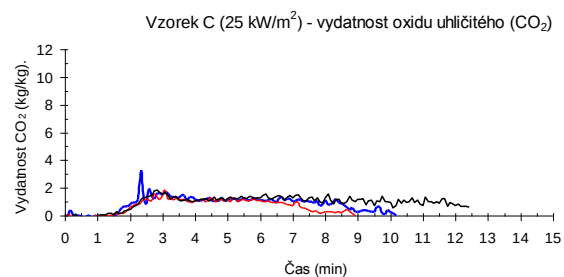
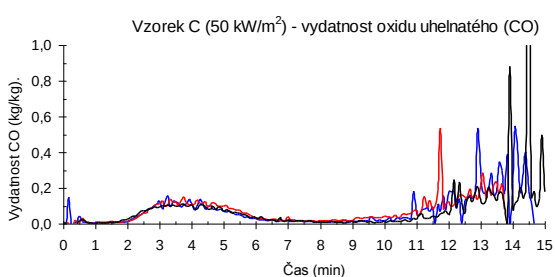
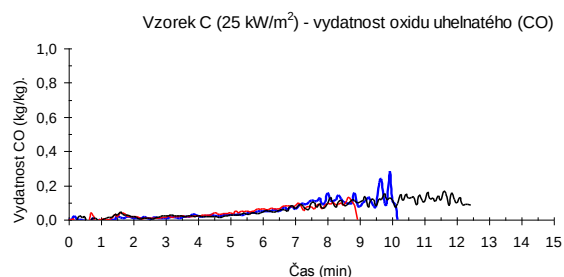
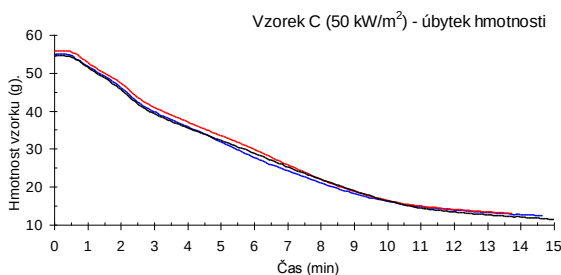
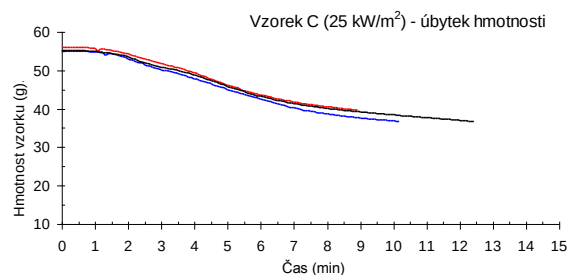
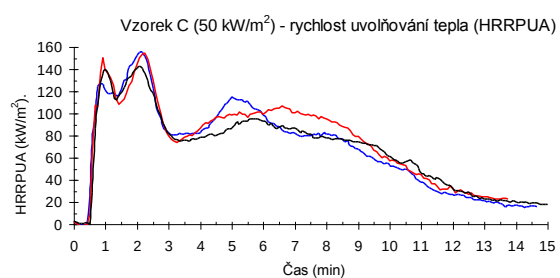
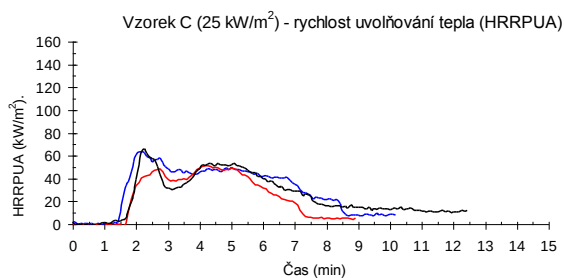


Vzorek C

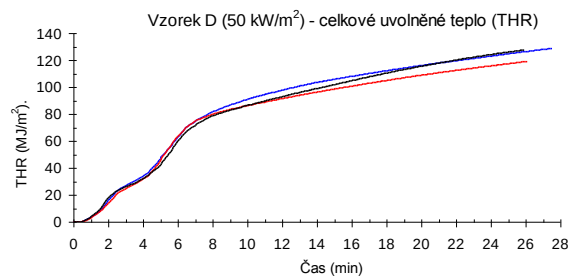
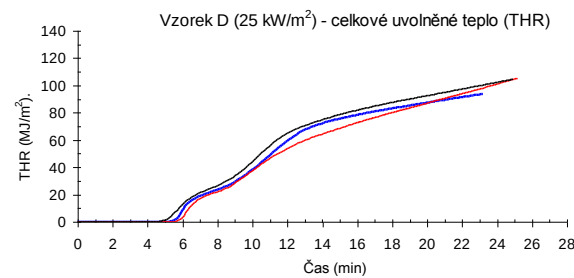
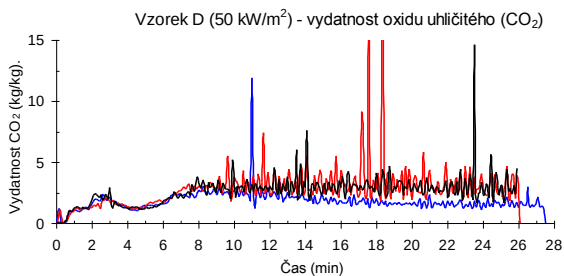
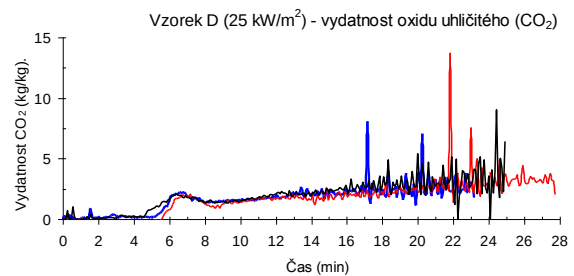
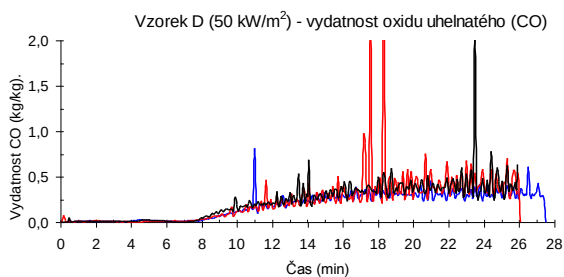
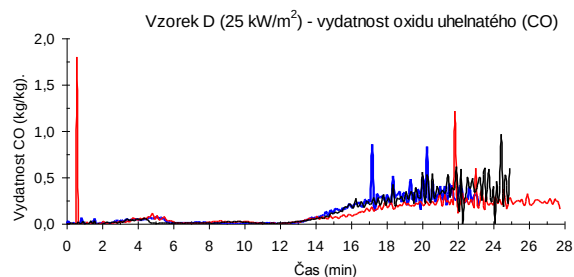
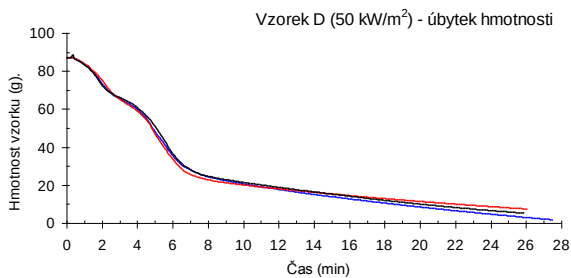
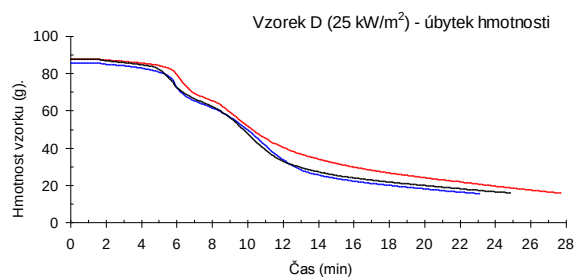
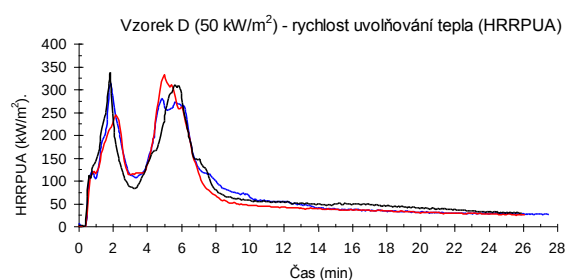
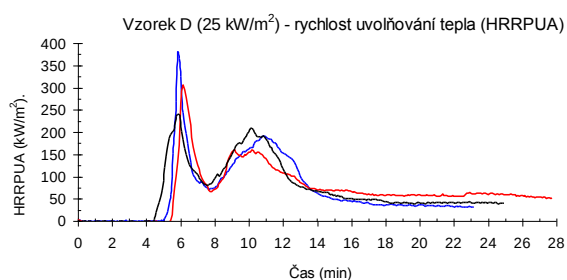
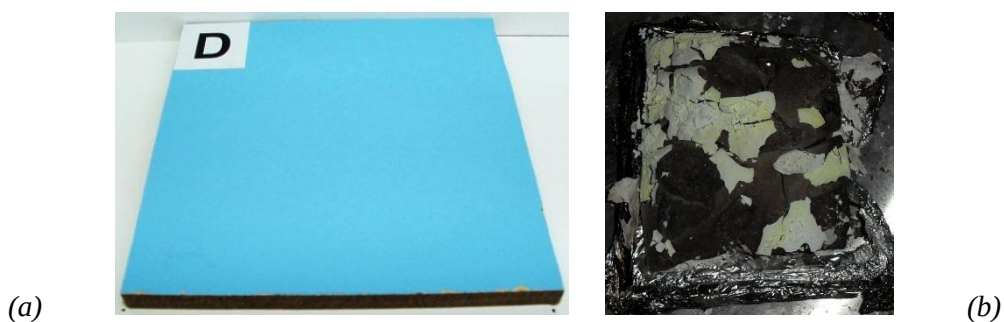
(a)



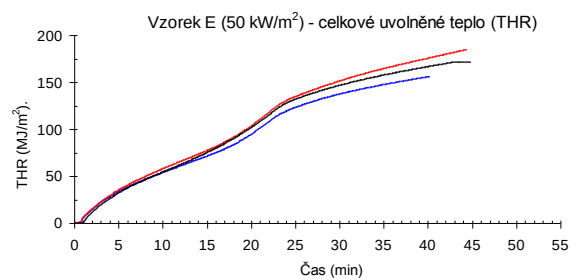
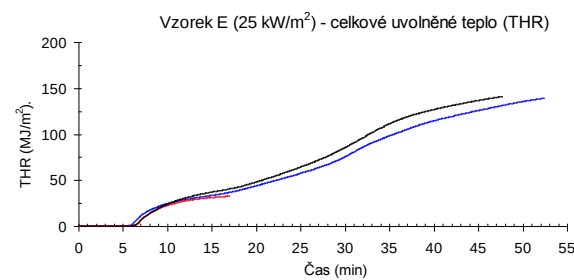
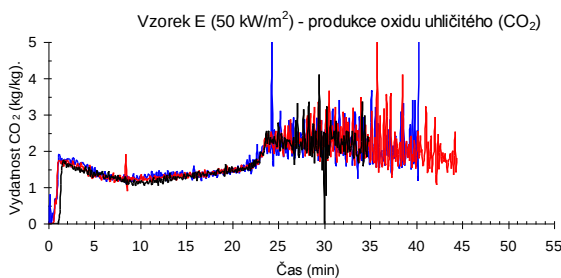
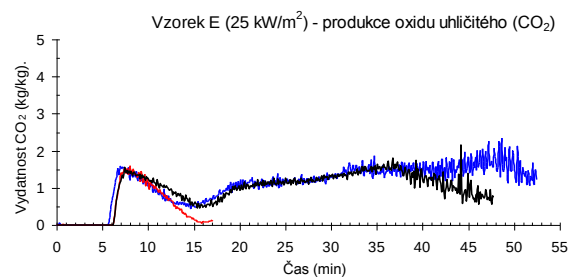
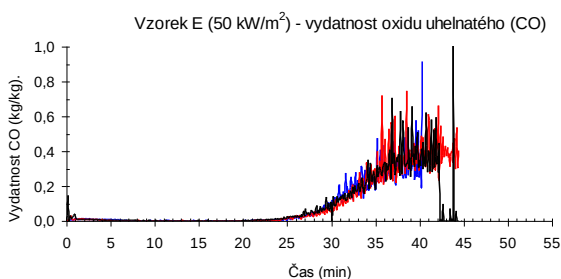
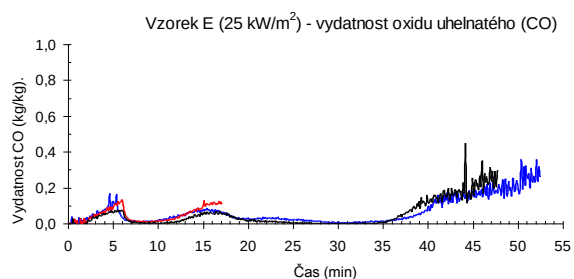
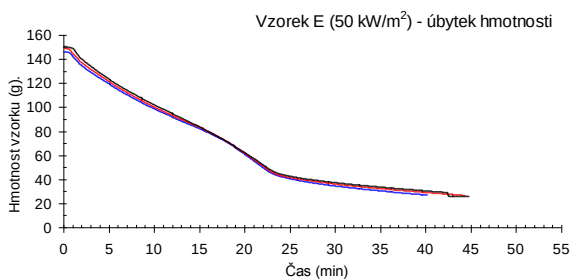
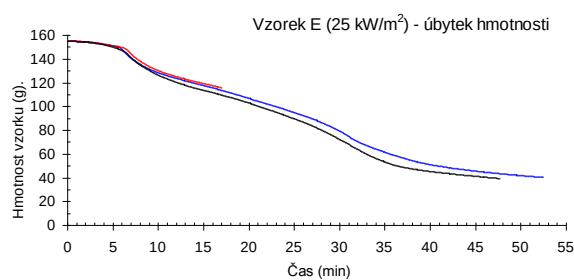
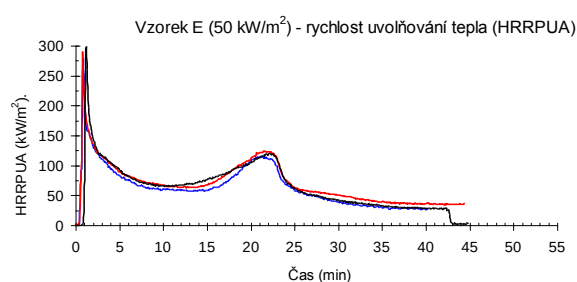
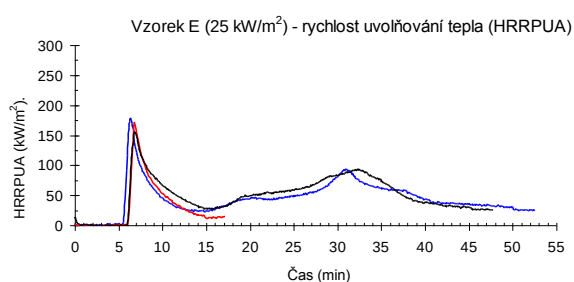
(b)



Vzorek D



Vzorek E

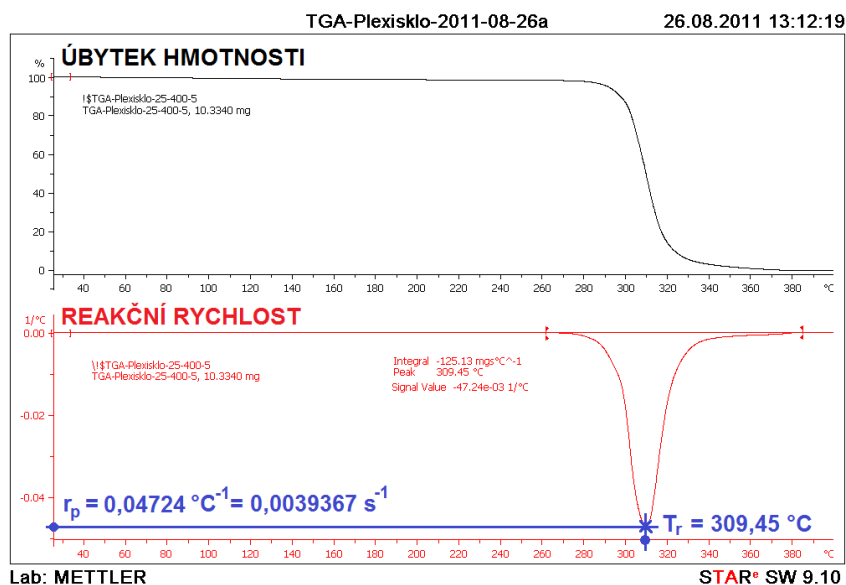


Příloha 2:

Termogravimetrická analýza (TGA) pro polymethylmetakrylát (PMMA – plexisklo)

Vzorek PMMA	Referenční teplota T_r (°C)	Referenční rychlost r_p	
		(1/°C)	(1/s)
1	309,45	0,04724	0,0039367
2	310,96	0,04177	0,0034808
3	305,38	0,04211	0,0035092
4	303,85	0,03753	0,0031275
5	303,30	0,04499	0,0037492
Průměr	305,69	0,04273	0,0035607

TGA s lineárním nárůstem teploty (5 °C/min) ve vzdušné atmosféře provedena na Univerzitě Konstantína Filozofa v Nitře na Katedře fyziky s využitím přístroje typu METTLER Toledo TGA/SDTA 851e



Grafický výstup pro vzorek 1; výstupy pro ostatní 4 vzorky pro obsáhlost nepřiloženy



Ilustrační fotografie přístroje METTLER Toledo TGA/SDTA 851

Příloha 3:

Příklady vstupních souborů pro software FDS6 použitých v rámci Experimentu 1

V této příloze jsou jako příklad uvedeny dva vstupní soubory z prezentovaných CFD simulací šachtového experimentu v Kapitole 3. Oba soubory představují zadávaná specifika, tj. například přední a boční desku z PMMA u modelu šachty s částečným hořlavým opláštěním nebo pohyblivou stropní přepážku u členěné šachty. První vstupní soubor je zadán kompletní, druhý soubor pouze v části definované stropní přepážky. Vstupní soubor pro model průběžné nehořlavé šachty a šachty s přední PMMA deskou nejsou z důvodu rozsáhlosti uváděny.

Vstupní soubor 1: Fáze experimentu 2 – varianta B – výpočetní síť 6,25 mm

```
&HEAD CHID = 'F2_vB_6_25mm_8meshes', TITLE = 'Phase 2 - variant B - PMMA front and side wall; Fire test in CSI Prague, 08/2011' /
```

```
&TIME T_END = 600 / 10 min. = 600 s
```

```
&MESH ID = 'mesh_0', XB = 0.3,1.0, 0.0,0.4, 0.00000,0.15000, IJK = 112,64,24 / ... mesh 6.25 mm ... 172.032 cells
&MESH ID = 'mesh_1', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.00000,0.26875, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_2', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.26875,0.53750, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_3', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.53750,0.80625, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_4', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.80625,1.07500, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_5', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.07500,1.34375, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_6', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.34375,1.61250, IJK = 48,64,43 / ... mesh 6.25 mm ... 132.096 cells
&MESH ID = 'mesh_7', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.61250,1.90000, IJK = 48,64,46 / ... mesh 6.25 mm ... 141.312 cells
```

```
&REAC ID = 'PMMA'
FYI = 'MMA monomer, C_5 H_8 O_2'
FUEL = 'PMMA'
EPUMO2 = 13125
C = 5
H = 8
O = 2
SOOT_YIELD = 0.022/
```

```
&VENT XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.9,1.9, SURF_ID = 'OPEN' / ... upper part (top) above the shaft and above the inlet tunnel
&VENT XB = 1.0,1.0, 0.0,0.4, 0.0,0.15, SURF_ID = 'OPEN' / ... opening for the inlet tunnel
```

```
&RADI NUMBER_RADIATION_ANGLES = 300 / ... default value for N_R_A is 100 in FDS
```

```
*** SHAFT WALLS ***
```

```
&SURF ID = 'WALL'
DEFAULT = .TRUE.
MATL_ID = 'YTONG'
COLOR = 'GRAY'
BACKING = 'VOID'
THICKNESS = 0.1 /
```

```
&MATL ID = 'YTONG'
DENSITY = 500.
CONDUCTIVITY = 0.12
SPECIFIC_HEAT = 1.0 /
```

```
*** PMMA front and side boards ***
```

```
&VENT XB = 0.0,0.0, 0.0,0.4, 0.0,1.9, COLOR = 'BLUE', SURF_ID = 'PMMA FRONT' / ... front wall made of 10mm thick PMMA board
&VENT XB = 0.0,0.3, 0.4,0.4, 0.0,1.9, COLOR = 'BLUE', SURF_ID = 'PMMA SIDE + WALL' / ... side YTONG wall with PMMA
```

```
&SURF ID = 'PMMA FRONT'
BACKING = 'VOID'
MATL_ID = 'PMMA'
THICKNESS = 0.010
BURN_AWAY = .TRUE.
CELL_SIZE_FACTOR = 0.125/
```

```

&SURF ID = 'PMMA SIDE + WALL'
      MATL_ID = 'PMMA', 'YTONG'
      BACKING = 'INSULATED'
      THICKNESS = 0.010, 0.10
      BURN_AWAY = .TRUE.
      CELL_SIZE_FACTOR = 0.125 /

&MATL ID = 'PMMA'
      CONDUCTIVITY = 0.19
      SPECIFIC_HEAT = 1.32
      DENSITY = 1190.
      SPEC_ID = 'PMMA'
      N_REACTIONS = 1
      NU_SPEC = 1.
      REFERENCE_TEMPERATURE(1) = 306.59
      REFERENCE_RATE(1) = 0.003560667
      HEATING_RATE(1) = 5.
      HEAT_OF_REACTION = 1500.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 25000.
      ABSORPTION_COEFFICIENT = 1000. /

*** FIRE - PROPAN BURNER 6 kW ... 0.075*0.075 m = 0.005625 m2, HRRPUA = 6/0.005625 = 1066.666 kW/m2 ***

&OBST XB = 0.0,0.075, 0.325,0.4, 0.0,0.1, COLOR = 'BLACK' / ... box representing burner
&VENT XB = 0.0,0.075, 0.325,0.4, 0.1,0.1, SURF_ID = 'BURNER' /
&SURF ID = 'BURNER'
      COLOR = 'RED'
      HRRPUA = 1066.666
      TAU_Q = -1.0
      RAMP_Q = 'BURNER_RAMP_Q' /
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T= 0.0, F = 1.0 /
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T= 180.0, F = 1.0 /
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T= 181.0, F = 0.0 /

*** OUTPUT FILES ***

&DUMP DT_RESTART = 30.,DT_PL3D = 5.00, WRITE_XYZ = .TRUE., PLOT3D_QUANTITY = 'TEMPERATURE','U-VELOCITY','V-VELOCITY','W-VELOCITY' /
&BNDF QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE' /

&SLCF PBX = 0.150, QUANTITY = 'VELOCITY',VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBY = 0.200, QUANTITY = 'VELOCITY',VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBZ = 1.900, QUANTITY = 'VELOCITY',VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBX = 0.150, QUANTITY = 'TEMPERATURE',VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBY = 0.200, QUANTITY = 'TEMPERATURE',VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBZ = 1.900, QUANTITY = 'TEMPERATURE',VECTOR = .TRUE. /

*** AIR VELOCITY SENSORS ***

&DEVC QUANTITY = 'VELOCITY', ID = 'A_c (fds)', XYZ = 0.1,0.35,1.9 /
&DEVC QUANTITY = 'VELOCITY', ID = 'A_tunel (fds)', XYZ = 0.65,0.2,0.075 /

*** THERMOCOUPLES ***

&PROP ID = 'TC_K_0.5mm', BEAD_DIAMETER = 0.0005 /
&PROP ID = 'TC_K_1.5mm', BEAD_DIAMETER = 0.0015 /

&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_a_1 (fds)', XYZ = 0.05,0.3,0.40 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_a_2 (fds)', XYZ = 0.05,0.2,0.40 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_a_3 (fds)', XYZ = 0.05,0.1,0.40 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_a_4 (fds)', XYZ = 0.15,0.2,0.40 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_a_5 (fds)', XYZ = 0.25,0.2,0.40 /

&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_b_1 (fds)', XYZ = 0.05,0.3,1.15 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_b_2 (fds)', XYZ = 0.05,0.2,1.15 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_b_3 (fds)', XYZ = 0.05,0.1,1.15 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_b_4 (fds)', XYZ = 0.15,0.2,1.15 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_b_5 (fds)', XYZ = 0.25,0.2,1.15 /

&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_1.5mm', ID = 'T_c (fds)', XYZ = 0.1,0.35,1.9 /
&DEVC QUANTITY = 'THERMOCOUPLE', PROP_ID = 'TC_K_0.5mm', ID = 'T_tunel (fds)', XYZ = 0.65,0.2,0.075 /

```

*** HEAT FLUX SENSORS ON THE BACK SHAFT WALL ***

&DEVC XYZ = 0.3,0.2,0.275, QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX', IOR=-1, ID='R_1 (fds) gauge heat flux' /
 &DEVC XYZ = 0.3,0.2,0.525, QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX', IOR=-1, ID='R_2 (fds) gauge heat flux' /

&TAIL /

Vstupní soubor 2: Fáze experimentu 3 – výpočetní síť 12,5 mm

&HEAD CHID = 'F3_12_5mm', TITLE = 'Phase 3 – separated shaft including self-closed opening in a ceiling partition, 20 kW propane burner, 6 meshes - 12,5 mm, Fire test in CSI Prague, 08/2011' /
 &TIME T_END = 1260 / ... 21 min = 1260 s

&MESH ID = 'mesh_0', XB = 0.3,1.0, 0.0,0.4, 0.0,0.15, IJK = 56,32,12 / ... mesh 12,5 mm ... 21.504 cells
 &MESH ID = 'mesh_1', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.0,0.50, IJK = 24,32,40 / ... mesh 12,5 mm ... 30.720 cells
 &MESH ID = 'mesh_2', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 0.5,1.00, IJK = 24,32,40 / ... mesh 12,5 mm ... 30.720 cells
 &MESH ID = 'mesh_3', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.0,1.50, IJK = 24,32,40 / ... mesh 12,5 mm ... 30.720 cells
 &MESH ID = 'mesh_4', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 1.5,2.00, IJK = 24,32,40 / ... mesh 12,5 mm ... 30.720 cells
 &MESH ID = 'mesh_5', XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 2.0,2.50, IJK = 24,32,40 / ... mesh 12,5 mm ... 30.720 cells

&VENT XB = 0.0,0.3, 0.0,0.4, 2.50,2.5, SURF_ID = 'OPEN' / ... the top opening of the computational domain above the shaft
 &VENT XB = 0.0,0.0, 0.0,0.4, 1.95,2.5, SURF_ID = 'OPEN' / ... top front part
 &VENT XB = 0.3,0.3, 0.0,0.4, 1.95,2.5, SURF_ID = 'OPEN' / ... top back part
 &VENT XB = 0.0,0.3, 0.4,0.4, 1.95,2.5, SURF_ID = 'OPEN' / ... top left side
 &VENT XB = 0.0,0.3, 0.0,0.0, 1.95,2.5, SURF_ID = 'OPEN' / ... top right side
 &VENT XB = 1.0,1.0, 0.0,0.4, 0.0,0.15, SURF_ID = 'OPEN' / ... opening for the inlet tunnel

*** **vypuštěná část vstupního souboru – zadání hořáku, opláštění šachty apod. – viz předchozí vstupní soubor 1** ***

&SURF ID = 'PARTITION'
 MATL_ID = 'CONCRETE'
 THICKNESS = 0.05 /

&MATL ID = 'CONCRETE'
 DENSITY = 2300.
 CONDUCTIVITY = 1.3
 SPECIFIC_HEAT = 1.02 /

*** CREATING SHAFT CEILING PARTITION - MOVEABLE IN TIME ***

&OBST XB = 0.0,0.4, 0.00,0.15, 1.9,1.95, COLOR = 'BLACK', SURF_ID = 'PARTITION'/
 &OBST XB = 0.0,0.4, 0.25,0.40, 1.9,1.95, COLOR = 'BLACK', SURF_ID = 'PARTITION'/
 &OBST XB = 0.0,0.1, 0.15,0.25, 1.9,1.95, COLOR = 'BLACK', SURF_ID = 'PARTITION'/
 &OBST XB = 0.3,0.4, 0.15,0.25, 1.9,1.95, COLOR = 'BLACK', SURF_ID = 'PARTITION'/

&OBST XB = 0.2,0.4, 0.0,0.4, 1.95,2.0, RGB = 41, 36, 33, DEVC_ID = 'TIMER_1' / COLOR = 'INDIGO'
 &DEVC XYZ = 0.25,0.0,1.925, ID = 'TIMER_1', SETPOINT = 240., QUANTITY = 'TIME', INITIAL_STATE = .FALSE./

&OBST XB = 0.15,0.2, 0.0,0.4, 1.95,2.0, RGB = 105, 105, 105,, DEVC_ID = 'TIMER_2' /COLOR = 'RED'
 &DEVC XYZ = 0.175,0.0,1.925, ID = 'TIMER_2', SETPOINT = 480., QUANTITY = 'TIME', INITIAL_STATE = .FALSE./

&OBST XB = 0.125,0.15, 0.0,0.4, 1.95,2.0, RGB = 128, 128, 128,, DEVC_ID = 'TIMER_3' /COLOR = 'MAROON'
 &DEVC XYZ = 0.125,0.0,1.925, ID = 'TIMER_3', SETPOINT = 720., QUANTITY = 'TIME', INITIAL_STATE = .FALSE./

*** **vypuštěná část vstupního souboru – výstupní data, měřicí zařízení apod. – viz předchozí vstupní soubor 1** ***

&TAIL /

Příloha 4:

Fáze 3 – členěná šachta – porovnání teplot a tepelného toku

