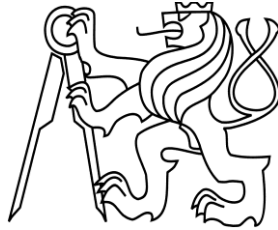


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**ALTERNATIVNÍ POSTUPY ZJIŠŤOVÁNÍ
A HODNOCENÍ REAKCE NA OHEŇ PRO FASÁDY**

ALTERNATIVE METHODS OF REACTION TO FIRE ASSESSMENT
FOR FACADES

Bc. Kateřina Kašová

vedoucí práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kašová	Jméno: Kateřina	Osobní číslo: 395588
Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Alternativní postupy zjišťování a hodnocení reakce na oheň pro fasády	
Název diplomové práce anglicky: Alternative Methods of Reaction to Fire Assessment for Facades	
Pokyny pro vypracování: 1) Shrňte stav poznání v oblasti požární bezpečnosti fasád, tj. rizika šíření požáru, příklady skutečných požárů, požadavky na požární vlastnosti (reakce na oheň, požární odolnost, požární otevřenost aj.) a jim odpovídající požární zkoušky, odstupové vzdálenosti a požárně nebezpečný prostor. 2) Analyzujte možnosti využití konické kalorimetrie pro hodnocení požární otevřenosti fasád. 3) Navrhněte alternativní požární zkoušku pro hodnocení požární otevřenosti fasády. 4) Vytvořte matematický CFD model pro požární zkoušku dle předchozího bodu.	
Seznam doporučené literatury: Normy požárního kodexu řady ČSN 73 08.. a normy související Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide (MCGRATTAN, K. et al.) Enclosure Fire Dynamics (KARLSSON, QUINTIERE) ISO 13785-1 a 2	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 3. 10. 2016	Termín odevzdání diplomové práce: 8. 1. 2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

7. 10. 2016	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Alternativní postupy zjišťování a hodnocení reakce na oheň pro fasády jsem vypracovala samostatně pod vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D. a s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Městci Králové dne 7.1. 2017

.....

Bc. Kateřina Kašová

Poděkování

Při vysokoškolském studiu a tvorbě této práce mi pomohlo mnoho lidí. Ráda bych jim touto formou poděkovala.

První poděkování patří mé rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost po celou délku mého studia. Velké poděkování patří také panu Ing. Martinu Pospíšilovi, Ph.D. za podporu při tvorbě této práce.

Dále bych ráda touto cestou vyjádřila poděkování vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za jeho cenné rady, trpělivost při vedení mé diplomové práce a za pomoc při zkouškách. Rovněž bych ráda poděkovala panu Ing. Liboru Ševčíkovi za odborné vedení při zkoušce v kónickém kalorimetru v TÚPO HZS ČR a panu Ing. arch. Bc. Petru Hejtmánkovi za pomoc při požární zkoušce na UCEEB ČVUT v Praze.

Tato diplomová práce vznikla s podporou projektu Univerzitního centra energeticky efektivních budov (OP VaVpI č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091). Poděkování též patří společnosti TFH dřevěné skeletové domy s.r.o. za poskytnutí vzorků pro požární zkoušku v kónickém kalorimetru.

Obsah

Prohlášení	II
Poděkování	III
Abstrakt	VI
Abstract.....	VI
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	VII
Latinské symboly.....	VII
Řecké symboly.....	VIII
Zkratky.....	VIII
1 Úvod.....	1
1.1 Cíle.....	3
1.2 Struktura.....	3
2 Současný stav poznání	4
2.1 Druhy konstrukčních částí a požární odolnost.....	4
2.2 Určení požární uzavřenosti a otevřenosti obvodových plášťů.....	5
2.2.1 Množství uvolněného tepla	7
2.2.2 Hustota tepelného toku.....	9
2.2.3 Matematické modely.....	10
2.2.4 Kónická kalorimetrie.....	13
2.2.5 Zkoušky reakce na oheň fasád	16
2.2.6 Zkouška požární odolnosti	19
2.3 Měření při požárních zkouškách	21
2.3.1 Měření teplot	22
2.3.2 Měření tepelného toku	24
3 Experiment 1 – zkouška dřevovláknité desky s omítkou v kónickém kalorimetru ..	26
3.1 Zkušební vzorky.....	26
3.2 Specifikace použitých zařízení.....	27
3.3 Průběh zkoušky	28
3.4 Diskuze získaných výsledků	31
3.5 Závěr malorozměrové zkoušky	34
4 Experiment 2 – alternativní zkouška požární uzavřenosti.....	35
4.1 Referenční zkouška	35
4.1.1 Průběh experimentu s referenční pecí	37
4.1.2 Matematické modelování referenční pece	40
4.1.3 Porovnání výsledků experimentu a matematického modelu referenční pece	43

4.2	Zkouška obvodové stěny s hořlavým obkladem	45
4.2.1	Průběh zkoušky obvodové stěny s hořlavým obkladem	45
4.2.2	Matematický model pece s hořlavým obkladem.....	48
4.2.3	Porovnání výsledků experimentu a matematického modelu zkušební pece s hořlavým obkladem.....	51
4.3	Porovnání výsledků referenční zkoušky a zkušební pece s hořlavým obkladem	53
4.4	Závěr alternativní zkoušky pro určení požární uzavřenosti	55
5	Závěr	57
	Literatura	58
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	61
	Seznam grafů.....	61
	Příloha 1 – zdrojový kód pro referenční pec	63
	Příloha 2 – zdrojový kód pro zkoušku obvodové stěny s hořlavým obkladem.....	67

Abstrakt

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, a to na současný stav poznání a experimentální část. Současný stav poznání shrnuje metody pro hodnocení požární uzavřenosti obvodových stěn. Jednotlivé metody jsou stručně popsány. Jedná se o výpočetní metody (hustota tepelného toku, množství uvolněného tepla, matematické modely) a požární zkoušky (zkouška požární odolnosti, zkouška třídy reakce na oheň fasád a kónická kalorimetrie). Experimentální část navazuje na stav poznání a je rozdělena na dva dílčí experimenty. Experiment 1 je zaměřen na zkoušku dřevovláknité desky s omítkou v kónickém kalorimetru. Experiment 2 se zabývá alternativní zkouškou požární uzavřenosti. V rámci experimentu je navržena požární pec ve dvojím provedení – referenční pec a pec s požárním obkladem. Pece jsou namodelovány a následně zkoušeny. Dále je provedeno srovnání matematického modelu a experimentu. V závěru je uvedeno shrnutí a doporučení zkoušení požární uzavřenosti.

Klíčová slova

obvodová stěna; fasáda; dřevostavba; požární uzavřenost; CFD modelování; kónická kalorimetrie; reakce na oheň pro fasády; dřevovláknitá deska; omítka; OSB deska

Abstract

The diploma thesis is divided into two parts, a current state of knowledge and an experimental part. The current state of knowledge summarises methods for assessing the fire closure of external walls. The individual methods are briefly described. It is, particularly calculation methods (heat flux density, heat release rate, mathematical models) and fire tests (fire resistance test, reaction to fire test for facades and cone calorimetry). The experimental part builds on the state of knowledge and is divided into two experiments. Experiment 1 is aimed to test wood fibreboard with plaster in a cone calorimeter. Experiment 2 deals with alternative test of fire closure. In the experiment a fire furnace is designed in two version - the reference furnace and the furnace with combustible cladding. Furnaces are modeled and then tested. It is a comparison of the mathematical model and experiment. In conclusion is a summary of recommendation and testing fire closure.

Keywords

external walls; façade; wooden constructions; fire foreclosure; CFD modeling; cone calorimetry; fire tests for facades; fibreboard plaster; OSB board

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

d	Velikost odstupové vzdálenosti	m
d_i	Tloušťka i -té vrstvy	m
H	Výhřevnost hořlavého výrobku	MJ.kg ⁻¹
H_D	Výhřevnost dřeva (17 MJ.kg ⁻¹)	MJ.kg ⁻¹
$\Delta h_{c,eff}$	Efektivní výhřevnost	MJ.kg ⁻¹
I	Hustota tepelného toku	kW.m ⁻²
j	Počet druhů hořlavých výrobků v obvodové stěně	-
k_2	Součinitel poměru hustoty tepelného toku ze sálavých ploch (I_2/I_1 z ploch S_{p02}/S_{p01}); tabulková hodnota	-
M_i	Plošná hmotnost	kg.m ⁻²
m_e	Koncová hmotnost	g
m_i	Počáteční hmotnost	g
m^{\prime}_{i-e}	Průměrná rychlost úbytku hmotnosti	g.m ⁻² .s ⁻¹
p_o	Procento požárně otevřených ploch v požárním úseku	%
p_v	Výpočtové požární zatížení	kg.m ⁻²
Q	Množství uvolněného tepla z m ² hořlavého výrobku	MJ.m ⁻²
$q^{\prime\prime}_{180}$	Průměrná hodnota rychlosti uvolňování tepla HRR po dobu 180 s	kW.m ⁻²
$q^{\prime\prime}_{300}$	Průměrná hodnota rychlosti uvolňování tepla HRR po dobu 300 s	kW.m ⁻²
$q^{\prime\prime}_{celk}$	Celkové uvolněné teplo (THR)	MJ.m ⁻²
$q^{\prime\prime}_{max}$	Max. dosažená hodnota rychlosti uvolňování tepla (HRR)	kW.m ⁻²
S_p	Celková plocha obvodové stěny	m ²
S_{p0}	Požárně otevřená plocha	m ²
S_{p01}	Zcela požárně otevřená plocha obvodové stěny	m ²
S_{p02}	Částečně požárně otevřená plocha obvodové stěny	m ²
T_N	Teplota plynů v hořícím prostoru	°C

t_{celk}	Délka trvání zkoušky	s
t_{ign}	Čas po vzplanutí vzorku	s
U	Elektrické napětí	mV
v	Rychlost odhořívání hmoty	kg.m ⁻² .min ⁻¹

Řecké symboly

ε	Emisivita ($\varepsilon = 1,0$)	-
ρ	Objemová hmotnost	kg.m ⁻³
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	W.m ⁻² .K ⁻⁴

Zkratky

A1, A2, B - F	Třída reakce na oheň výrobků
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Cross laminated timber (křížem vrstvené dřevo)
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
d0	Doplňková klasifikace vyjadřující odkapávání plameně hořících kapek (0 – materiál neodkapává)
DP1, DP2, DP3	Druh konstrukční části
EPS	Expandovaný polystyren
FDS	Fire Dynamics Software
HRR	Heat Release Rate (rychlost uvolňování tepla)
HZS	Hasičský záchranný sbor
LDS	Lehký dřevěný skelet
POP	Požárně otevřená plocha
PUP	Požárně uzavřená plocha
REW	Mezní stavy požární odolnosti (R – únosnost, E – celistvost, W – omezení sálání tepla)
s1	Doplňková klasifikace vyjadřující intenzitu vývoje kouře (1 – nízká tvorba kouře)

TDS	Těžký dřevěný skelet
THR	Total heat release (celkové uvolněné teplo)
TÚPO	Technický ústav požární ochrany
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

1 Úvod

I přes veškerá aktivní požárně bezpečnostní opatření nejsou velké požáry staveb ve světě ani v České republice ojedinělé. Pokud dojde ke vzniku požáru a jeho rozšíření jsou uplatněna pasivní požárně bezpečnostní opatření, mezi které patří dělení objektu do požárních úseků, použití vyhovujících výrobků a stavebních konstrukcí, dostatečné řešení únikových cest, stanovení požárně nebezpečného prostoru okolo objektu, apod. Právě velikost požárně nebezpečného prostoru může být překážkou při stavbě objektů s velkým procentem požárně otevřených ploch, jako jsou např. stavby s prosklenou fasádou, stavby s venkovním hořlavým obkladem nebo dřevostavby. Velká plocha požárně nebezpečného prostoru je nežádoucí především u staveb umístěných na malých pozemcích, jelikož se v tomto prostoru nemůže postavit jiná stavba, příp. může dojít k zasažení požárně nebezpečného prostoru na sousední pozemek, čemuž se snažíme vyhnout z důvodu omezení práv vlastníka.

V případě umístění stavby do vymezeného požárně nebezpečného prostoru jiného objektu dochází ke zvýšení možnosti rozšíření požáru. Hrozbu nepředstavuje pouze samotný plamen, ale především množství a velikost tepla dopadajícího na hořlavé materiály. Pokud je hořlavý materiál vystaven teplotě vzplanutí, dochází k rozšíření požáru na sousední objekt. Sílu tepla vyzářeného plamenem je možné uvést na různých případech požárů staveb.

Jedním z nejhorších požárů ve fotbalové historii se udál 11. května 1985 v Anglii na stadionu Valley Parade. Během jednoho ze zápasů začal hořet odpadkový koš na kraji tribuny pro diváky. Jelikož celá tribuna byla ze dřeva, došlo k rychlému rozvoji požáru. Během první minuty se požár rozšířil na střechu tribuny a v druhé minutě byla polovina střechy délky cca 100 m v plamenech. Celou tribunu plameny zachvátily zhruba za tři minuty (obr. 1). Hasiči, kteří přijeli do 5 minut, nemohli s požárem nic udělat, pouze uchránit okolní stavby. Na obr. 1b je znázorněna linie označující vzdálenost, kde je teplo pro člověka únosné.



a)



b)

obr. 1 Požár fotbalového stadionu Valley Parade v anglickém Bradfordu 11. května 1985 (zdroj: www.pozary.cz): a) na fotbalový zápas přišlo přes 11 000 diváků; b) z důvodu vysokého hodnotě uvolněného tepla vznikla linie, na které je teplo pro člověka únosné

Důležitost dodržení dostatečných odstupových vzdáleností je patrná na obr. 2. V červnu 2003 a prosinci 2004 došlo ve středověkém městečku Řepora na Praze 5 k požárům. Obou případech došlo k rozšíření požáru na více objektů, poprvé se jednalo o tři stavby a podruhé o dvě. Na obr. 2b je vyznačen nedostatečný odstup mezi objekty. Vzdálenost mezi objekty je cca 2 m, což je pro dřevostavby nedostatečné, jelikož velikost odstupové vzdálenosti pro požárně otevřenou plochu takového stavení může přesáhnout přes 5 m.



a)



b)

obr. 2 Požár skanzenu Řepora na Praze 5 (zdroj: www.pozary.cz): a) zásah jednotek HZS v dýchací technice; b) jelikož jsou objekty v těsné blízkosti, dochází k rozšíření požáru na sousední objekty

Hustota zástavby se netýká pouze skanzenu, ale i měst a vesnic. Poslední uvedený příklad požáru se udál v obci Činěves v okrese Nymburk (obr. 3). Jedná se klasickou českou vesnici, kde 31. ledna 2012 došlo k požáru autocentra. Během noci shořely prostory karosárny, skladu náhradních dílů a číst dílen. Díky pohotovým jednotkám HZS a přízni počasí nedošlo k rozšíření ohně do lakovny, plynové kotelny se skladem plynu a k čerpací stanici pohonných hmot. Jelikož se jedná o původní zástavbu, tak nejsou určeny odstupové vzdálenosti. V případě iniciace ohně v jiné části centra, by mohlo dojít k rozšíření požáru na sousední objekty v obci.



a)



b)

obr. 3 Požár autocentra v Činěvesi (zdroj: nymbursky.denik.cz): a) situace autocentra s červeným vyznačením požárem zasažené části areálu; b) požár se s ohledem na zasaženou část nerozšířil na sousední objekty v obci

V původní zástavbě není mezi jednotlivými objekty dostatečný odstup a může dojít k rozšíření požáru na sousední objekty. V dnešní době jsou objekty řešeny tak, aby požárně nebezpečný prostor nezasahoval do požárně otevřených ploch sousedních objektů ani na sousední pozemek.

1.1 Cíle

Cílem diplomové práce je:

- shrnout stav poznání v oblasti požární bezpečnosti fasád;
- získání přehledu o možnostech prokázání požární uzavřenosti obvodových stěn dřevostaveb druhu DP3 a stěn s hořlavým obkladem;
- snaha zhodnotit požární uzavřenost u dřevěné sloupkové stěny s vnějším opláštěním z dřevovláknité desky s tenkovrstvou omítkou (konstrukce druhu DP3) pomocí kónické kalorimetrie;
- navrhnout alternativní požární zkoušku pro hodnocení požární otevřenosti fasád, včetně vytvoření matematického modelu.

1.2 Struktura

Kapitola „Úvod“ uvádí základní motivaci a cíl diplomové práce. Obsahuje strukturu jednotlivých kapitol.

Kapitola „Současný stav poznání“ vysvětluje některé z pojmů použitých v práci. Součástí je přehled metod, které lze použít pro hodnocení požární uzavřenosti. Jednotlivé metody jsou stručně popsány.

V kapitole *„Experiment 1 – kónická kalorimetrie“* je popsána a vyhodnocena zkouška kónickým kalorimetrem, která proběhla v Technickém stavu požární ochrany v Modřanech. Pro zkoušku byly vyrobeny vzorky z dřevovláknité desky s cementovou omítkou firmou TFH dřevěné skeletové domy.

Součástí kapitoly *„Experiment 2 – alternativní zkouška požární otevřenosti“* jsou dva případy požární pece – referenční pece a pece s hořlavým obkladem. Obě pece jsou řešeny matematickým modelem FDS a zkouškou v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Buštěhradu.

Kapitola „Závěr“ shrnuje poznatky z této práce a vyzdvihuje nejdůležitější poznatky.

2 Současný stav poznání

Jednou z kapitol požárně bezpečnostního řešení je stanovení požárně nebezpečného prostoru u požárně otevřených ploch obvodových a střešních plášťů. Z požárního hlediska je výhodnější konstrukci klasifikovat jako plochu požárně uzavřenou. Tato konstrukce musí splnit hodnotu požadované požární odolnosti stanovenou normou a nesmí obsahovat jiný druh konstrukce, než je stanoveno (článek 8.4.3 [1]). V případě, že konstrukce tuto podmínku nesplní, je konstrukční část klasifikována jako požárně otevřená plocha.

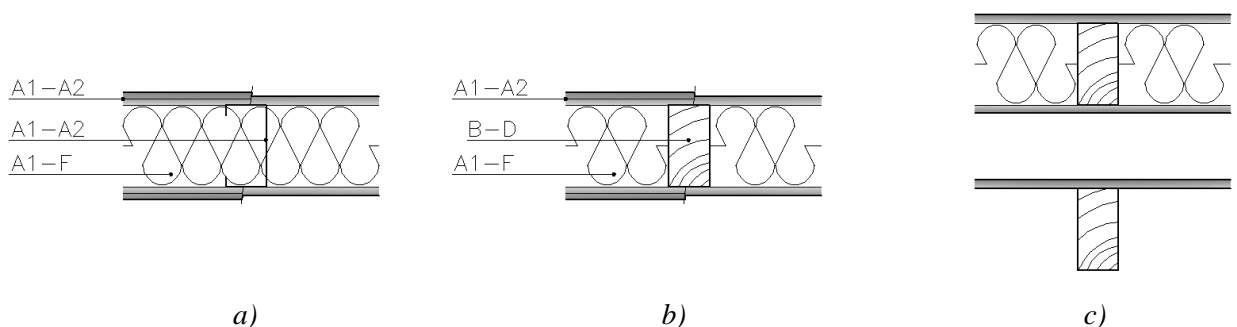
Klasifikace požární uzavřenosti obvodových stěn, případně střešních, závisí i na druhu konstrukční části. Konstrukční část druhu DP1 ve většině případů definujeme jako požárně uzavřenou plochu. Pokud má konstrukce druhu DP1 kontaktní zateplovací systém s hořlavým izolantem nebo např. dřevěný obklad, je požární uzavřenost stanovena jednoduchým výpočtem, stejně je tomu i u konstrukcí druhu DP2. U konstrukce druhu DP3 jednoduchý výpočet nelze použít, požární uzavřenost se stanovuje složitějším výpočtem, matematickým modelem nebo požární zkouškou.

2.1 Druhy konstrukčních částí a požární odolnost

Dle české legislativy [2] třídíme konstrukční části na druhy DP1, DP2, DP3 v závislosti:

- na zvýšení intenzity požáru vlivem hoření hořlavých výrobků;
- na vlivu použitých hořlavých výrobků na únosnost a stabilitu konstrukční části.

Pro jednotlivé konstrukční části jsou požadavky postupně snižovány. Druh konstrukce DP1 (obr. 4a) má požadavky nejvyšší, nesmí zvyšovat intenzitu požáru při stanovené požární odolnosti a hořlavé výrobky nesmí mít vliv na únosnost a stabilitu konstrukční části. Druh konstrukce DP2 (obr. 4b) nesmí zvyšovat intenzitu požáru při stanovené požární odolnosti, ale hořlavé výrobky už mají vliv na únosnost a stabilitu konstrukční části (nosné prvky jsou hořlavé, např. dřevěné sloupky). Pokud konstrukční část zvyšuje intenzitu požáru a hořlavé výrobky zabudované do konstrukce mají vliv na únosnost a stabilitu konstrukce, je tato část zařazena jako druh DP3 (obr. 4c).

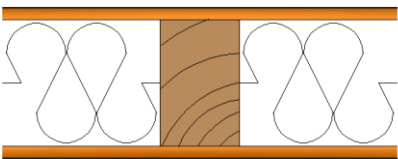
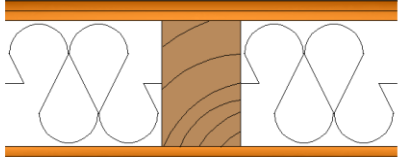


obr. 4 Druhy konstrukčních částí: a) konstrukce DP1; b) konstrukce DP2; c) konstrukce DP3 [3]

Určení druhu konstrukční části je závislé nejen na třídách reakce na oheň použitých výrobků, ale také na chování prvku jako celku při zkoušce požární odolnosti. Díky této závislosti nemusí mít konstrukční části druhu DP1 bezpodmínečně všechny výrobky nehořlavé. Příkladem může být lehká příčka s nosnou konstrukcí z kovových profilů opláštěných sádrokartonovými deskami s hořlavou foukanou tepelnou izolací (např. celulóza).

Druh konstrukční části má vliv na klasifikaci požární uzavřenosti obvodových stěn. Tento fakt je nejvíce patrný u dřevostaveb, tedy objektu s konstrukčními částmi druhu DP2 a DP3. V případě obvodových plášťů z konstrukcí druhu DP2 lze konstrukci z podstaty své definice hodnotit jako požárně uzavřenou plochu, zatímco konstrukční části druhu DP3 jsou ve většině případů klasifikovány jako plochy požárně otevřené. Příklady, kdy je konstrukce DP3 považována za požárně uzavřenou plochu, jsou znázorněny v tab. 1. Důležitým faktorem u těchto skladeb je požární odolnost.

tab. 1 Příklady konstrukce druhu DP2 a DP3 jako požárně uzavřené plochy [4]

Příklad skladby	Požární odolnost
 <ul style="list-style-type: none"> - sádrovláknitá deska (A1/A2 - s1, d0) tl. 15 mm - nosná dřevěná konstrukce 100x160 mm / tepelná izolace z minerálních vláken tl. 160 mm - sádrovláknitá deska (A1/A2 - s1, d0) tl. 15 mm 	<p><i>REW 15 DP2</i></p> <p><i>REW 60 DP3</i></p>
 <ul style="list-style-type: none"> - 2x sádrovláknitá deska (A1/A2 - s1, d0) tl. 2x15 mm - nosná dřevěná konstrukce 100x160 mm / tepelná izolace z minerálních vláken tl. 160 mm - 2x sádrovláknitá deska (A1/A2 - s1, d0) tl. 2x15 mm 	<p><i>REW 60 DP2</i></p> <p><i>REW 90 DP3</i></p>

2.2 Určení požární uzavřenosti a otevřenosti obvodových plášťů

Obvodové stěny můžeme definovat jako požárně uzavřenou plochu (PUP), částečně nebo zcela požárně otevřenou plochu (POP). Hranice těchto skupin jsou určeny mezními hodnotami hustoty tepelného toku I a množstvím uvolněného tepla Q (tab. 2). Tyto hodnoty jsou předpokládány v rovině vnějšího líce obvodové stěny. Aby konstrukce mohla být klasifikována jako požárně uzavřená plocha, musí vykazovat požadovanou požární odolnost [1].

tab. 2 Mezní hodnoty hustoty tepelného toku a množství uvolněného tepla [1]

Specifikace požární uzavřenosti	I [$kW \cdot m^{-2}$]	Q [$MJ \cdot m^{-2}$]
požárně uzavřená plocha	$I \leq 15$	$Q \leq 150$
částečně požárně otevřená plocha	$15 < I \leq 60$	$150 < Q \leq 350$
zcela požárně otevřená plocha	$I > 60$	$Q > 350$

Pro obvodové stěny druhu DP1 či DP2 lze použít obě výše zmíněná kritéria (I i Q), zatímco pro stěny druhu DP3 lze použít pouze výpočet hustoty tepelného toku. Konstrukční části druhu

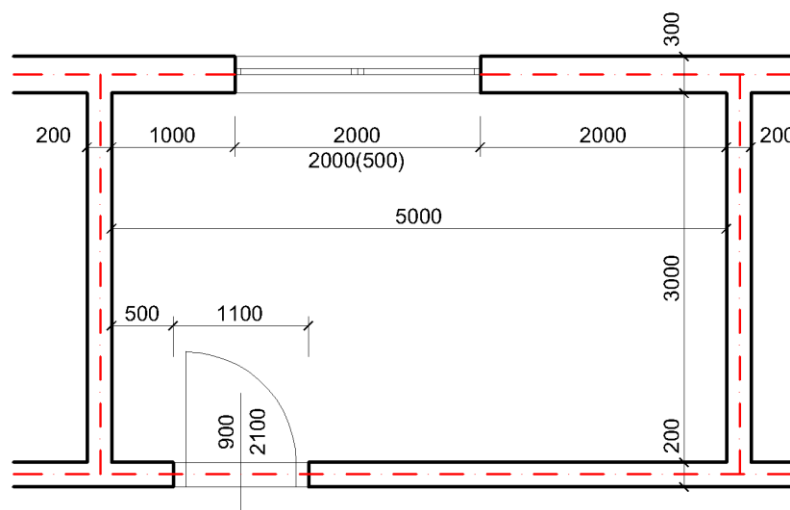
DP1 a DP2 jsou klasifikovány jako požárně uzavřená plocha. Výjimku tvoří případy, kdy je vnější povrch z výrobku třídy reakce na oheň E či F s uvolněným teplem $Q > 150 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Stěna je pak posuzována jako zcela požárně otevřená plocha (dle článku 8.4.5 [1]).

Samotné konstrukce druhu DP1 a DP2 (tj. bez případných hořlavých povrchových úprav) lze hodnotit z hlediska jejich definice jako PUP, jelikož v požadované době požární odolnosti neuvolňují teplo. U konstrukcí druhu DP1 je důvod patrný, nosná část je nehořlavá. Konstrukce DP2 sice mají hořlavou nosnou konstrukci, ale ta je chráněna požárně účinným opláštěním z obou stran. U dřevěných sloupkových obvodových stěn DP3 lze použít stejný princip jako u druhu DP2, a to aplikací dostatečně požárně účinného opláštěním z vnější strany stěny [5].

Rozdíl velikosti požárně nebezpečného prostoru ve vztahu k požární otevřenosti ploch v obvodovém plášti je uveden na následujícím příkladu.

Příklad 1

Požární úsek je kancelářský prostor s dřevěnými dveřmi v obložkové zárubni, okny v dřevěném rámu a podlahou z keramické dlažby. Dle přílohy B [1] je hodnota výpočtového požárního zatížení $p_v = 42 \text{ kg/m}^2$. Světla výška místnosti je 3,0 m. Obvodová stěna ve všech případech vykazuje požadovanou požární odolnost.



obr. 5 Půdorys požárního úseku kanceláře

- 1) Obvodová stěna klasifikována jako PUP. POP je okenní otvor velikosti 2000 x 2000 mm. odstupová vzdálenost $d = 2,14 \text{ m}$ (dle přílohy F.2 [1])
- 2) Obvodová stěna je klasifikována jako částečně POP, okenní otvor je zcela POP.

$$S_{po} = S_{po1} + k_2 \cdot S_{po2} = 4 + 0,586 \cdot 11 = 10,446 \text{ m}^2$$

$$S_{po1} = 2,0 \cdot 2,0 = 4 \text{ m}^2$$

$$S_{po2} = 3,0 \cdot 5,0 - 2,0 \cdot 2,0 = 11 \text{ m}^2 \dots \text{plocha částečně požárně otevřená}$$

$$k_2 = 0,586 \quad (\text{redukční součinitel pro částečně POP, tabulka 24 [1]})$$

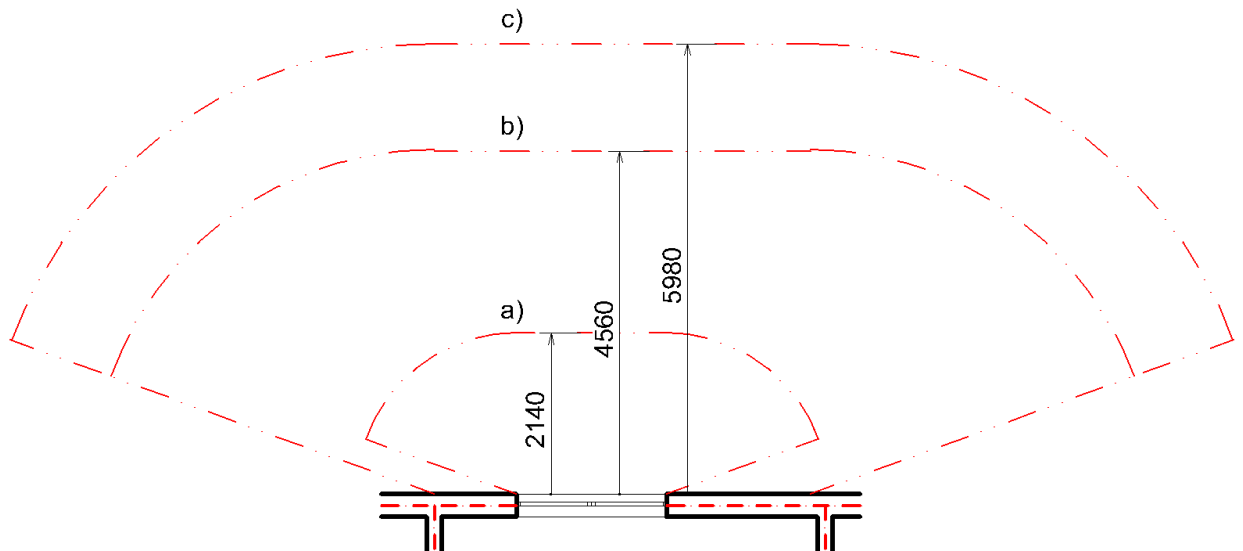
$$p_o = \frac{S_{po}}{S_o} \cdot 100 = \frac{10,446}{3,0 \cdot 5,0} \cdot 100 \cong 70\%$$

odstupová vzdálenost $d = 4,58 \text{ m}$ (dle příloha F.1 [1])

- 3) Obvodová stěna včetně okenního otvoru je klasifikována jako zcela POP. Velikost POP je $5,0 \times 3,0 \text{ m}$.

odstupová vzdálenost $d = 5,98 \text{ m}$ (dle příloha F.1 [1])

Dle uvedených výpočtů je patrné, že velikost odstupové vzdálenosti pro částečně POP je téměř trojnásobný než pro případ PUP.



obr. 6 Porovnání odstupových vzdáleností a jim odpovídajících požárně nebezpečných prostorů pro řešený příklad se stěnou hodnocenou jako: a) PUP; b) částečně POP; c) zcela POP

Na klasifikaci požární otevřenosti obvodové stěny závisí velikost požárně nebezpečného prostoru. Zda se jedná o stěnu s plochou požárně otevřenou nebo uzavřenou, lze zjistit několika způsoby:

1) Výpočtem

- numerickým výpočtem (množství uvolněného tepla, hustota tepelného toku);
- matematickým modelem (např. CFD modelem).

2) Zkouškou

- zkouškou požární odolnosti;
- zkouškou reakce na oheň fasád;
- kónické kalorimetrie.

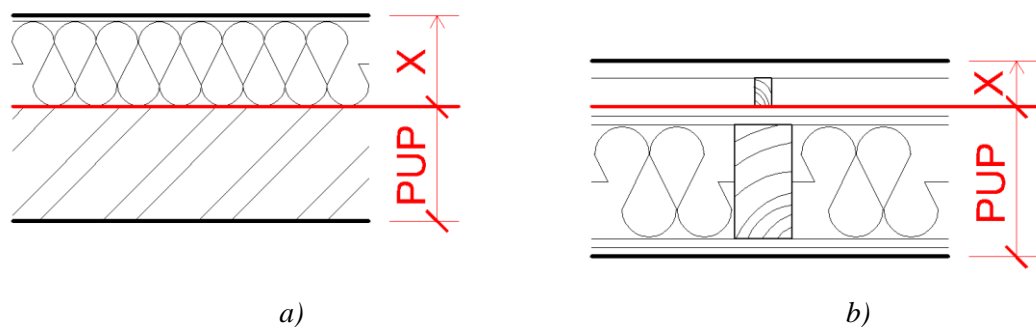
2.2.1 Množství uvolněného tepla

Často používaným numerickým výpočtem je určení požární otevřenosti pomocí množství uvolněného tepla z hořlavých hmot. Klasifikace je v tomto případě závislá na plošné hmotnosti a výhřevnosti použitých hořlavých materiálů.

$$Q = \sum_{i=1}^j M_i \cdot H_i = \sum_{i=1}^j d_i \cdot \rho_i \cdot H_i \quad (\text{Rovnice 1})$$

Q [MJ.m ⁻²]	množství uvolněného tepla z m ² hořlavého výrobku;
M_i [kg.m ⁻²]	plošná hmotnost i -tého druhu hořlavého výrobku umístěného na vnějším povrchu obvodové stěny [kg];
H_i [MJ.kg ⁻¹]	výhřevnost i -tého druhu hořlavého výrobku vnějšího povrchu obvodové stěny;
d_i [m]	tloušťka i -té vrstvy hořlavého výrobku vnějšího povrchu obvodové stěny;
ρ_i [kg.m ⁻³]	objemová hmotnost i -té vrstvy hořlavého výrobku vnějšího povrchu obvodové stěny;
j [-]	počet druhů hořlavých výrobků v obvodové stěně.

Tento výpočet se používá pouze u konstrukcí druhu DP1 a DP2 (obr. 7), např. obložení obvodové zděné stěny obkladem nebo kontaktním zateplovacím systémem s hořlavým izolantem. U konstrukcí druhu DP3 nelze výpočet množství uvolněného tepla použít, jelikož ve výpočtu nelze zanedbat nosnou konstrukci. U konstrukčních částí druhu DP3 se používá výpočet hustoty tepelného toku nebo požární zkouška.



obr. 7 Vrstvy zohledněné ve výpočtu: a) konstrukční část druhu DP1; b) konstrukční část druhu DP2. Poznámka: Kóta X označuje vrstvy zohledněné při posouzení požární otevřenosti

V případě kontaktního zateplení budov je z hlediska požární otevřenosti důležitá tloušťka a materiál izolantu (Příklad 2). V některých případech může hodnota množství uvolněného tepla přesáhnout limitní hodnotu 150 MJ.m⁻² a obvodová stěna je klasifikována jako částečně nebo zcela požárně otevřená plocha. U dřevěného obkladu je hlavním parametrem ve výpočtu tloušťka materiálu (Příklad 3). U tohoto typu úpravy vnější fasády se většinou pohybujeme u klasifikace částečně a zcela požárně otevřené plochy.

Příklad 2

Zateplení zděného objektu kontaktním zateplovacím systémem s tepelnou izolací EPS.

- zděná stěna s požadovanou požární odolností;
- pěnový polystyren (EPS) tloušťky 150 mm: objemová hmotnost 20 kg.m⁻³, výhřevnost 39 MJ.kg⁻¹ (položka 1.7.19 [6])

$$Q = \sum_{i=1}^j M_i \cdot H_i = \sum_{i=1}^j d_i \cdot \rho_i \cdot H_i = 0,15 \cdot 20 \cdot 39 = 117 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \leq 150 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

Stěna klasifikována jako požárně uzavřená plocha.

Příklad 3

Objekt s obvodovou stěnou konstrukce druhu DP2 s dřevěným obkladem.

- konstrukce DP2 je PUP a vykazuje požadovanou požární odolnost;
- obklad ze smrkového dřeva tloušťky 20 mm: objemová hmotnost cca $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, výhřevnost $17 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (položka 1.2.10 [6])

$$Q = \sum_{i=1}^j M_i \cdot H_i = \sum_{i=1}^j d_i \cdot \rho_i \cdot H_i = 0,02 \cdot 500 \cdot 17 = 170 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$150 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} < Q = 170 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \leq 350 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

Stěna klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha.

2.2.2 Hustota tepelného toku

Složitějším výpočtem je hustota tepelného toku. Tento výpočet lze použít u všech konstrukčních druhů. Pro určení požární uzavřenosti obvodových stěn se používá zjednodušená rovnice:

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_N + 273)^4 \quad (\text{Rovnice 2})$$

kde: I [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$] hustota tepelného toku;

ε [-] emisivita s předpokládanou hodnotou $\varepsilon = 1,0$;

σ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] Stefan-Boltzmannova konstanta rovna hodnotě $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;

T_N [$^{\circ}\text{C}$] teplota hořícího povrchu.

Hodnota teploty plynů je proměnná. Do rovnice se dosazuje předpis křivky vnějšího požáru nebo také uhlovodíkovou křivku (pro hořlavé plyny a páry). Všechny zmíněné křivky jsou závislé na čase trvání požáru.

U dřevostaveb z konstrukcí druhu DP3 je možné použít i efektivnější zhodnocení požární otevřenosti, případně uzavřenosti obvodových stěn [5] v závislosti na výhřevnosti a rychlosti odhořívání. Tento způsob se využívá například v softwarech pro požární CFD simulace.

$$I = \frac{v \cdot H}{60} \quad (\text{Rovnice 3})$$

kde: I [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$] hustota tepelného toku;

v [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$] rychlost odhořívání hmoty;

H [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] výhřevnost hořlavého výrobku vnějšího povrchu obvodové stěny.

Při výpočtu lze zohlednit skutečnost, že z celkového uvolněného tepla se obvykle uvolňuje větší část ve formě proudění vzduchu a zplodin hoření a menší část sáláním tepla, přestup tepla vedením se zanedbává. Na straně bezpečnosti lze uvažovat hodnotu radiačního podílu rovnu 50 % z celkového uvolněného tepla. U matematických modelů se radiační podíl předpokládá i menší (Příklad 4) [5].

Příklad 4

Srub s masivní dřevěnou obvodovou stěnou, která vykazuje požadovanou požární odolnost.

- rychlost odhořívání dřeva $v \approx 0,45 \text{ kg.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ (Příloha 2, Tabulka G.2 [1]);
- výhřevnost jehličnatého dřeva $H_D = 17 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (Tabulka 1, položka 1.2.10 [6])

1) Radiační podíl 50 % [5]

$$I = 0,50 \cdot \frac{v \cdot H}{60} = 0,50 \cdot \frac{0,45 \cdot 17\,000}{60} = 63,8 \text{ kW.m}^{-2} > 60 \text{ kW.m}^{-2}$$

Obvodová stěna je klasifikována jako požárně otevřená plocha.

2) Radiační podíl 35%

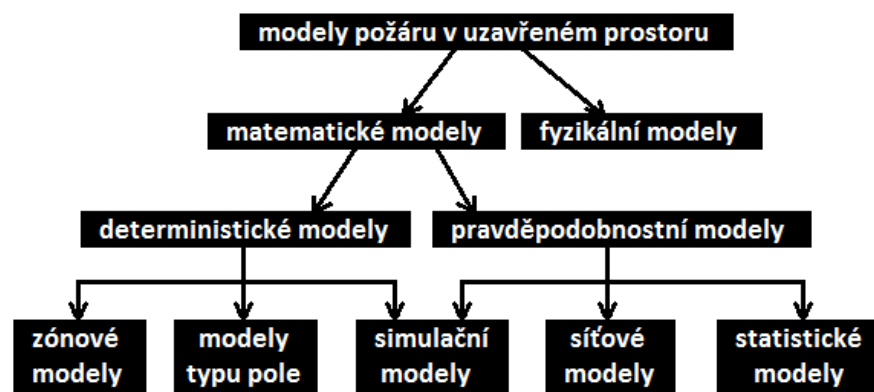
$$I = 0,35 \cdot \frac{v \cdot H}{60} = 0,35 \cdot \frac{0,45 \cdot 17\,000}{60} = 44,6 \text{ kW.m}^{-2}$$

$$15 \text{ kW.m}^{-2} \leq 44,6 \text{ kW.m}^{-2} \leq 60 \text{ kW.m}^{-2}$$

Obvodová stěna je klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha.

2.2.3 Matematické modely

Pro požár v uzavřeném prostoru jsou používány matematické a fyzikální modely. Tyto modely jsou provázány a sledované veličiny se mohou vzájemně doplňovat. Rozdělení modelů požáru je znázorněno na obr. 8.



obr. 8 Přehled modelů požáru v uzavřeném prostoru [7]

Fyzikální modely napodobují požár za zjednodušených fyzikálních podmínek. V praxi se využívají různé velikosti zkoušek, například viz kapitola 2.2.4, 2.2.5 a 2.2.4.

Matematické modely využívají výpočetní techniku a řeší jednotlivé požární scénáře souborem rovnic. Výsledky matematických modelů se používají pro předpověď chování skutečných požárů. Aby tyto modely mohly sloužit k předpovídání vzniku a šíření požáru objektu, vyžaduje se uskutečnění jejich validace¹ a verifikace² [7]. Matematické modely dělíme do dvou základních skupin:

- modely pravděpodobnostní;
- modely deterministické.

Pravděpodobnostní matematické modely vycházejí z teorie pravděpodobnosti, kdy se rozvoj požáru popíše řadou náhodných událostí a stavů. Při náhodných pokusech se sleduje průběh požáru v čase. Jelikož průběh požáru není nikdy stejný, není modelování požáru touto metodou příliš rozšířeno. Při propojení pravděpodobnostních a deterministických modelů vznikají modely simulační, kdy samotný požár je řešen pomocí deterministického modelu (průběh požáru je znám) a vstupní data jsou brána z pravděpodobnostních modelů [7]. Pravděpodobnostní modely se rozdělují do podskupin:

- síťové modely;
- statické modely.

Deterministické matematické modely předpovídají rozvoj požáru a procesů s ním spojených na základě řešení matematických rovnic popisujících fyzikální a chemické děje při požáru. Při tvorbě modelu jsou specifikovány požární scénáře (fyzikální podmínky, které určují rozvoj a výsledky požáru) zahrnující např. množství a umístění hořlavých látek, místo vzniku požáru, dispozici objektu atd. [7]. Deterministické modely lze rozdělit do dvou přímých podskupin:

- zónové modely;
- modely typu pole (tzv. CFD modely).

Computational Fluid Dynamics (CFD)

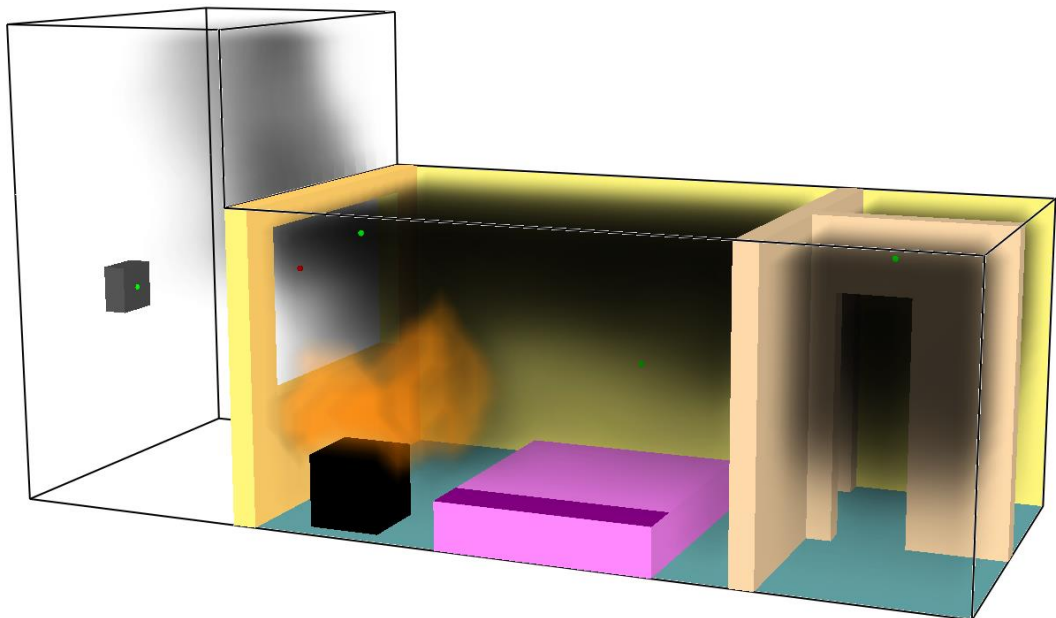
Computational Fluid Dynamics je alternativa pro fyzikální modely, která není tak cenově nákladná jako fyzikální modely. Tento způsob matematického modelování je možné uplatnit v mnoha oborech. Nejčastěji je modelování využíváno v letectví a kosmonautice (např. modelování motoru letadla, proudění vzduchu v oblasti křídla apod.), biomedicině (např. simulace proudění krve v lidské aortě), chemii (např. proudění při promíchávání tekavých látek), nebo automobilismu (např. obtékání vzduchu). V oboru stavebnictví je zjišťována kvalita prostředí (např. účinnost VZT zařízení, výměna a promíchávání vzduchu) či rozvoje požáru (např. šíření kouře a plamene) [8].

¹ Validace je systematické srovnání teoretického předpokladu s experimentem. Smyslem je nastavení programu tak, aby se výsledky matematického modelu přiblížily událostem, jež se vyskytují v reálných podmínkách.

² Při verifikaci programu je kontroluje modelovací prostředí, tj. správnost algoritmu, korektnost kódu z hlediska jeho fyzikální reprezentace a matematická přesnost výpočtu (tj. použitý model musí vyhovovat své specifikaci a musí být dodržen přesný popis modelu).

CFD modely (obr. 9) simulují proudění tekutin a plynů, přenos tepla a hmoty. Princip CFD modelů je založen na rozdělení výpočetní oblasti na množství trojrozměrných buněk, pro které jsou řešeny rovnice zachování hmoty, energie, hybnosti a částicového složení. Jedná se o časově závislé parciální diferenciální rovnice označované též jako Navier-Stokesovy (N-S). Výpočetní oblast je možné řešit jako dvou- (rovinná výpočetní síť) nebo třídimenzionální (trojrozměrná výpočetní síť) [9]. Výhodou jedno- nebo dvoudimenzionální výpočetní sítě je zrychlení samotného výpočtu. Proto se jednodušší výpočetní sítě používají pro určení správnosti vstupních parametrů pro složitější výpočetní modely.

Metoda je úspěšná při simulaci pohybu plynných zplodin hoření v uzavřeném prostoru a lze v ní zohlednit např. vliv venkovního tlaku vzduchu. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na hardware a velký vliv vstupních proměnných na výsledky [7]. Modelovaný jev může pokrývat výpočetní oblast až s miliony výpočetních buněk. Takovýto model může být, v závislosti na jemnosti výpočetní sítě, počítán několik dní až týdnů.



obr. 9 Matematický deterministický model typu pole – CFD model

Fire Dynamics Software (FDS)

FDS je jedna z mnoha softwarových aplikací využívající CFD model. FDS je používáno pro simulaci pohybu tekutin vyvolaného tepelným účinkem. Model představující požár je numericky řešen rovnicemi s ohledem na transport tepla a kouře od požáru a je používán zejména k modelování [9]:

- transportu tepla a produktů hoření od požáru při „pomalých rychlostech“;
- transportu tepla prouděním a sáláním mezi plynem a pevnými povrchy;
- pyrolýzy (proces hoření);
- šíření plamene a rozvoje požáru;

- aktivace sprinklerových hlavice a tepelných a kouřových detektorů;
- sprinklerového skrápění a hašení vodou (vodní mlhou apod.).

Zadání vstupních dat je přes textový soubor, který lze vytvořit v běžném textovém editoru ve formátu XXX.fds [10]. Tento soubor lze vytvořit přímo v programovacím jazyku nebo přes pre-processor s grafickým rozhraním. V textovém souboru jsou informace o výpočetní síti, okolním prostředí, geometrii prostoru, materiálových vlastnostech, vlastnosti hoření a požadované výstupy. Jsou modelovány překážky s definovanými ohraničujícími povrchy a s odkazem na materiálové vlastnosti (např. tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, objemová hmotnost, hořlavost atd.).

FDS počítá značné množství parametrů. Výstupní soubory jsou značně obsáhlé i s malým počtem sledovaných parametrů, proto uživatel musí stanovit druh dat, která se budou ukládat. Typickými sledovanými parametry pro plynnou fázi jsou teplota, rychlost proudění, tlakové poměry, hustota kouře apod. Na pevném povrchu je možné určit povrchovou teplotu, tepelný tok, rychlost uvolněného tepla nebo rychlost hoření. Dále jsou sledována výstupní data jako hmotnostní a energetický tok skrz otvory a pevné povrchy [9].

Pro určení požární uzavřenosti je důležitým parametrem hustota tepelného toku. V praxi se tento parametr měří pomocí radiometru. V rámci matematického modelu lze radiometr navrhnout a umístit do výpočetní sítě definovaný jako 'GAUGE HEAT FLUX'. Zároveň musí být určen směr, z kterého bude radiometr snímat tepelný tok. Výsledné hodnoty hustoty tepelného toku lze porovnat s mezními hodnotami hustoty tepelného toku tab. 2 a určit tím požární uzavřenost.

V České republice není v praxi matematické modelování v oblasti požární bezpečnosti příliš rozšířeno z důvodu nedostatku vstupních dat, časové náročnosti a finančních prostředcích investora. V zahraničí je tomu naopak, modely jsou používány při rekonstrukcích požárů, při evakuaci osob nebo šíření kouře ve velkých stavbách.

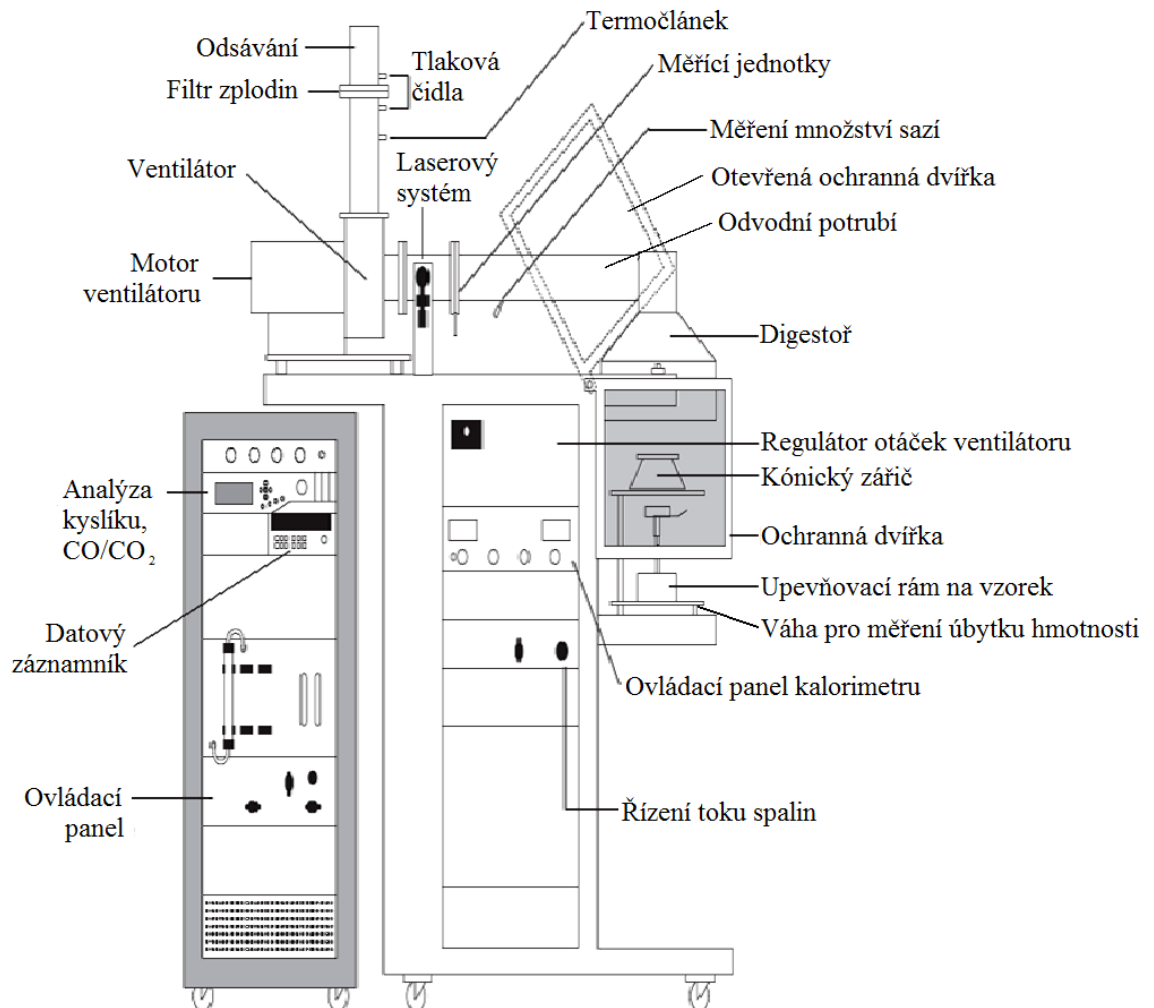
2.2.4 Kónická kalorimetrie

Tepelný tok lze získat také pomocí měření rychlosti uvolňování tepla (HRR = Heat Release Rate). HRR je množství energie uvolněné za jednotku času, obvykle uvedeno v jednotkách kW. Jediným způsobem jak zjistit rychlost uvolňování tepla je měřením při hoření. Nejobvyklejší metodou je měření v závislosti na spotřebě kyslíku při kalorimetrické zkoušce [11].

Kónická kalorimetrie [12] je malorozměrová zkouška pro stanovení některých požárně-technických charakteristik. Hlavní veličinou měřenou u této zkoušky je rychlost uvolňování tepla z koncentrace kyslíku ve zplodinách hoření za předpokladu, že velikost uvolněného tepla je přímo závislé na spotřebě kyslíku [13]. Dále je možné měřit úbytek hmotnosti, hustotu kouře či produkci spalin atd.

Zkušební zařízení dle ISO 5660-1

Kónický kalorimetr je zařízení založené na principu spotřeby kyslíku při spalování [14]. Přístroj se skládá z mnoha dílů a zařízení (obr. 10).



obr. 10 Schéma kónického kalorimetru [14]

Mezi základní součásti zkušební zařízení dle ISO 5660-1 patří:

- váha pro měření úbytku hmotnosti;
- upevňovací rám na vzorek;
- piezoelektrický zdroj jiskry;
- kónické topné spirály (kónický zářič);
- odvodní potrubí s analyzátory jednotlivých veličin;
- měřicí ústředna (ovládací panely).

Do upevňovacího rámu kónického kalorimetru se vkládá zkušební vzorek o rozměru 100x100 mm s maximální tloušťkou 50 mm. Vzorek je umístěn do upevňovacího rámu na váhy

pro zaznamenání úbytku hmotnosti v průběhu experimentu. Funkci zápalného zdroje má piezoelektrický zapalovač, který je umístěn pod kónickým zářičem a je ve vzdálenosti 5 mm nad vzorkem. Zapalovač se spíná v pravidelných jednosekundových intervalech a vypne se v okamžiku, kdy začne vzorek hořet.

Kónický zářič namáhá vzorek sálavým teplem o předepsané hustotě tepelného toku (0-100 kW.m⁻²). Zkušební norma stanovuje dvě zkušební hustoty tepelného toku: 35 kW.m⁻² a 50 kW.m⁻² [12]. Při hodnotě 35 kW.m⁻² je teplota zářiče cca 670 °C odpovídající maximální hodnotě nominální teplotní křivky vnějšího požáru [13].

Spodiny z hořícího vzorku se shromažďují do digestoře a jsou odváděny odvodním potrubím pomocí ventilátoru zajišťující normový průtok vzduchu 0,024 m³.s⁻¹ [15]. Před samotným ventilátorem je v potrubí umístěn odběr plynných vzorků v měřící jednotce (prstenec) a měření optické hustoty kouře pomocí laserového paprsku. V samotném prstenci se nachází dva filtry pro odstranění částic. V odtahovém potrubí je dále umístěn základní analyzátor koncentrace kyslíku, případně doplňkové analyzátor pro stanovení koncentrace oxidu uhličitého a uhelnatého, termoelektrický článek pro měření teploty, případně další zařízení pro analýzu produktů spalování [13].

Průběh zkoušky

Před provedením každého experimentu je potřeba provést měření teploty a okolní vlhkosti. Také musí proběhnout kalibrace přístroje – nastavení vah a analyzátoru kyslíku do výchozích poloh, případně analyzátoru dalších plynů, systém pro měření kouře aj. Analyzátor plynů jsou kalibrovány na nulovou hodnotu: při běžné koncentraci kyslíku ve vzduchu 20,95% a při koncentraci CO / CO₂ ve vzduchu 0,85 / 8,5% [14]. Systém měření kouře je kalibrován na nulovou hodnotu pomocí blokace laserového paprsku. Při kalibraci kalorimetru se stanoví kalibrační konstanta *C*, což je důležitá hodnota pro výpočty při vyhodnocování měření [12]. Na závěr je nastavena teplota kónického zářiče, která působí na povrch vzorku.

Vzorek 100x100 mm o maximální tloušťce 50 mm se umístí do upevňovacího rámu, přičemž neexponované plochy jsou chráněny proti vnějším vlivům hliníkovou fólií. Pokud je vzorek užší než 50 mm, musí být pod vzorek umístěna vrstva tepelné izolace z minerálních vláken pro vyrovnání tlouštěk. Pod zapnutý tepelný zářič chráněný destičkou se vloží připravený rám se vzorkem. Nad vzorek se umístí jiskrový zapalovač, zapne se a odstraní se ochranná destička. Jakmile dojde ke vzplanutí vzorku, zapalovač se vypne a odstraní se z prostoru spalování [13].

Test trvá maximálně 32 minut. Může být předčasně ukončen v těchto případech [13]:

- pokud již nedochází k dalšímu spalování (koncentrace kyslíku se vrátí na původní hodnotu 20,95%);
- pokud dojde k zhasnutí plamene (již nedochází k úbytku hmotnosti);
- pokud nedošlo k zapálení vzorku (délka zkoušky je 30 minut);

- pokud je ohrožena bezpečnost požární zkoušky.

Výstupem požární zkoušky je protokol s těmito zaznamenanými daty [13]:

- čas do vzplanutí vzorku [s];
- délka trvání zkoušky [s];
- hmotnost na začátku m_i a na konci zkoušky m_e [g];
- celkové uvolněné teplo q''_{celk} (THR = total heat release) [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$];
- maximální dosažená hodnota rychlosti uvolňování tepla q''_{max} (HRR) [$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$];
- maximální hodnota rychlosti uvolňování tepla HRR po 180 a 300 s – q''_{180} a q''_{300} [$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$];
- graf uvolňování tepla HRR v čase [$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$];
- efektivní výhřevnost $\Delta h_{c,\text{eff}}$ [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$];
- chování vzorku během zkoušky.

Normou je stanoven minimální počet 3 zkoušek jednoho vzorku. Výsledné hodnoty uvolněného tepla q''_{300} a výhřevnosti $\Delta h_{c,\text{eff}}$ se kontrolují a porovnávají s vypočteným aritmetickým průměrem, a pokud se jedna z hodnot odchyluje od průměru o více než 10 %, je nutné provést další 2 dodatečné zkoušky. Ze všech 5 hodnot se vypočte nový aritmetický průměr a vyloučí se dvě zkoušky, které jsou od průměru nejvzdálenější [13].

2.2.5 Zkoušky reakce na oheň fasád

Jedná se o zkoušku, při které jsou zkoušeny úpravy v požárně problematických detailech [16], např. otvory v obvodových stěnách, založení nad terénem. Tuto zkoušku lze použít i pro dřevěné obvodové stěny, kdy se místo kontaktního zateplení instaluje skladba dřevěného obvodového pláště. Reakce na oheň fasád nebo opláštění je hodnocena v případě, kdy je zkoušený povrch vystaven plamenům dopadajících na přední stranu fasády.

Máme dva druhy zkoušek - zkoušku středního rozměru a zkoušku velkého rozměru. Rozdíl zkoušek je v požárním scénáři, velikosti zkoušeného vzorku, výkonu použitého hořáku (tab. 3). Obě zkoušky mají trvání 30 minut.

Jak již bylo zmíněno, požární uzavřenost lze hodnotit porovnáním hustoty tepelného toku nebo množstvím uvolněného tepla s mezními hodnotami (tab. 2). V rámci zkoušek reakce na oheň fasád jsou instalovány radiometry, které měří tepelný tok. Pro určení požární uzavřenosti by se zařízení muselo instalovat v lici stěny tak, aby bylo možné zaznamenat hodnoty hořícího povrchu. Není zcela zřejmé, jak takové měření zajistit, jelikož radiometry nejsou uzpůsobeny pro měření při tak vysokých teplotách jako je na hořícím povrchu.

tab. 3 Porovnání zkoušky reakce na oheň fasád středního a velkého rozměru

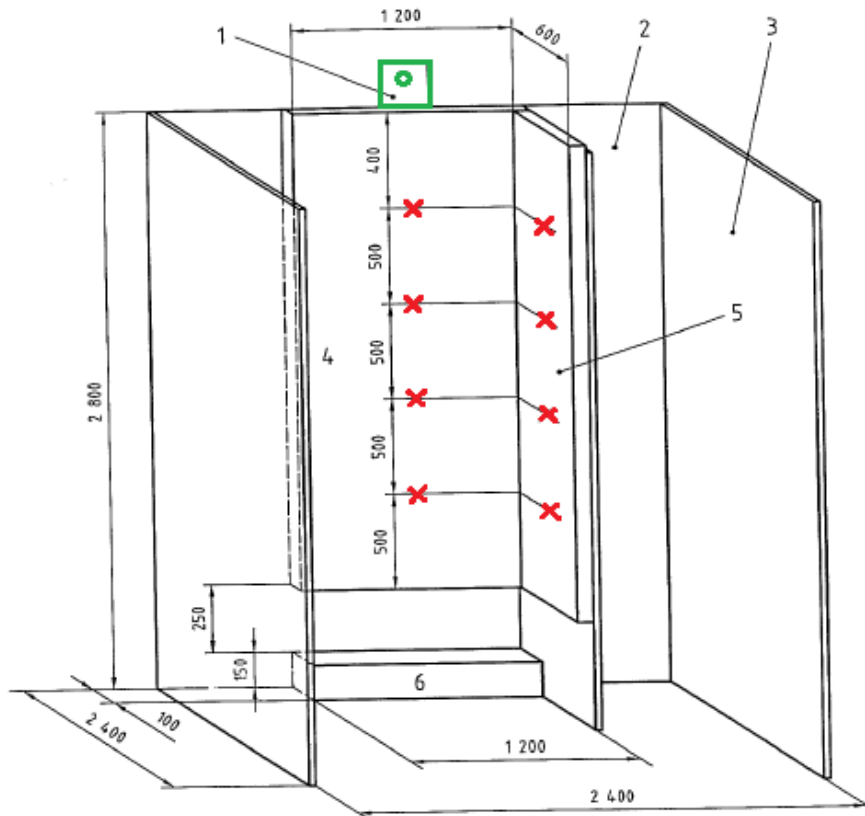
	<i>zkouška středního rozměru</i>	<i>zkouška velkého rozměru</i>
požární scénář	<i>vnitřní požár působí přímo na svislých fasádních výrobcích (hořák umístěn pod vzorkem)</i>	<i>požár vzniklý v interiéru začne skrz okenní otvor působit na fasádu objektu</i>
zkušební vzorek tvaru „L“		
<i>výška</i>	<i>2,4 m</i>	<i>5,7 m</i>
<i>délka hlavního ramene</i>	<i>1,2 m</i>	<i>3,0 m</i>
<i>délka vedlejšího ramene</i>	<i>0,6 m</i>	<i>1,2 m</i>
<i>otvor</i>	<i>není</i>	<i>2,0x1,2 m (v hlavním rameni)</i>
výkon hořáku	<i>100 kW</i>	<i>cca 3 MW</i>

Zkouška středního rozměru dle ČSN ISO 13785-1

Vzorek reprezentuje vnitřní kout, kde je účinek požáru nejvyšší. Zkušební těleso je instalováno včetně příslušných spojů stejným způsobem, jako je tomu v praxi. Jsou pokryty dvě plochy o stejné výšce 2,4 m, šířka ploch je různá 1,2 m a 0,6 m.

Zdrojem požáru je plynový propanový hořák s tepelným výkonem 100 kW pro zkoušení nadpraží oken i pro zkoušení založení na terén. Při zkoušce je hořák umístěn na podlaze podélně pod zkoušeným vzorkem [17].

Ve středu na vnějším povrchu zkušebního tělesa je umístěno pět termoelektrických článků (dle obr. 4). Jestliže jsou ve zkušebním tělese dutiny, umístí se do každé z nich dva termočlánky. Při zkoušce je dále instalován radiometr fóliového nebo termočlánekového typu pro měření tepelného toku. Terčik pro snímání tepelného toku je plochý s maximálním průměrem 10 mm a je umístěn ve vodou chlazeném tělese. Radiometr je instalován v nehořlavé izolační desce ve výšce 2,65 m nad hořákem [17]. S takto umístěným radiometrem nelze určit požární uzavřenost, jelikož není měřen tepelný tok v lici stěny. Tato zkouška by se musela pro potřeby stanovení požární uzavřenosti modifikovat, ale zatím není zřejmé, jakým způsobem.



Legenda: 1 – umístění radiometru (označeno zeleně); 2 – zadní stěna; 3 – zástěna proti průvanu; 4 – zadní křídlo zkušebního tělesa; 5 – boční křídlo zkušebního tělesa; 6 – zapalovací hořák (výška 150 mm, hloubka 100 mm, šířka 1200 mm); X – poloha povrchových termočlánků (označeno červeně)

obr. 11 Zkušební zařízení pro středněrozměrovou zkoušku [17]

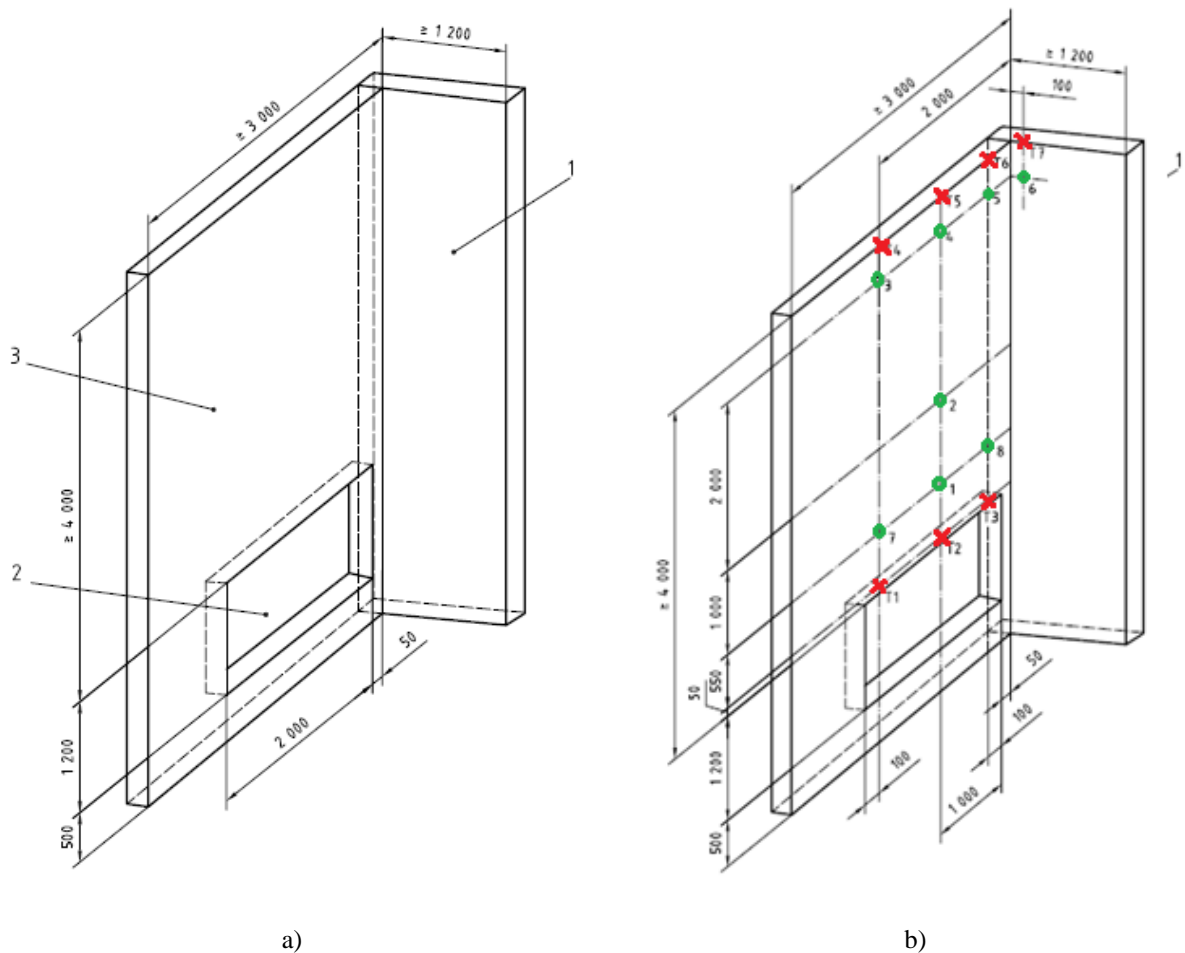
Zkouška velkého rozměru dle EN ISO 13785-2

Zkouška velkého rozměru se liší od zkoušky středního rozměru velikostí vzorku a přidáním otvoru do delší stěny vnitřního koutu. Čelní a boční strana vzorku je o výšce 5,7 m s různou délkou ramen, čelní je délky 3,0 m a boční rameno je délky 1,2 m. V čelní straně vzorku je umístěn otvor o velikosti 2,0 x 1,2 m. Druhým rozdílem je umístění hořáku. Při této zkoušce je hořák umístěn do spalovací komory, k jejíž otevřené straně se instaluje vzorek stěnou s otvorem. Zkušební vzorek je instalován v souladu s pokyny výrobce [18].

Spalovací komora není definována konkrétními rozměry, nýbrž je dána objemem 20 – 100 m³. Komora je vystavena z nehořlavých materiálů, které si zachovávají své tepelné vlastnosti a těsnost. Uvnitř jsou strop i stěny obloženy nehořlavým izolačním materiálem. Uvnitř komory je instalován propanový hořák [18].

Na čelní straně zkušební vzorku je instalováno 6 termočlánků a 7 radiometrů. Na boční straně je instalován v horní části 1 radiometr a 1 termočlánek. Umístění jednotlivých zařízení je následující (obr. 12):

- tři termočlánky měří teplotu horkých par nad okenním otvorem;
- čtyři termočlánky jsou umístěny ve výšce 4 m nad horní hranou otvoru;
- tři radiometry jsou ve výšce 0,6 m nad horní hranou otvoru;
- jeden radiometr je ve výšce 1,6 m nad horní hranou otvoru;
- čtyři radiometry jsou umístěny cca 0,4 m od horní hrany vzorku.



Legenda: 1 - boční stěna vzorku; 2 – otevřený otvor do spalovací komory; 3 – čelní stěna vzorku;
 O – měření tepelného toku (označeno **zeleně**); X – měření teploty termočlánky (označeno **červeně**)

obr. 12 Zkušební zařízení pro velkorozměrovou zkoušku: a) schéma zkušebního tělesa; b) umístění měřicích zařízení [18]

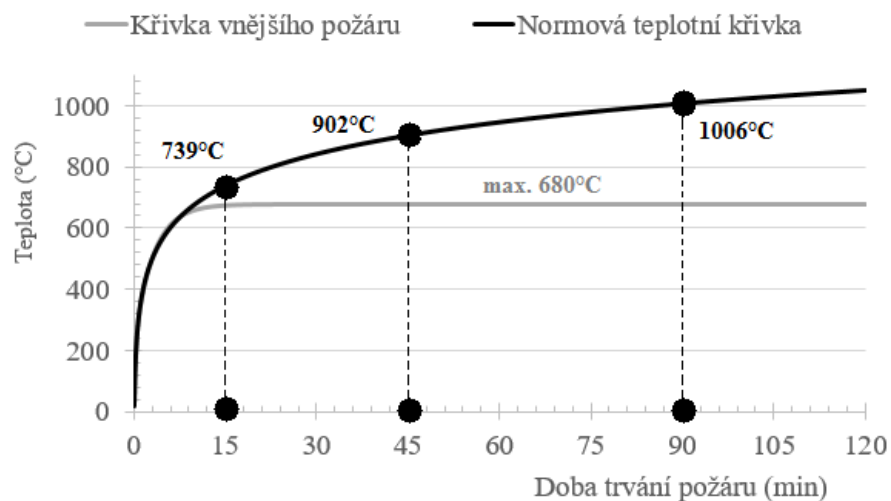
2.2.6 Zkouška požární odolnosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, důležitým faktorem u konstrukcí dřevostaveb je požární odolnost. Pokud obvodová stěna nevykazuje požární odolnost, je posuzována jako částečně nebo zcela požárně otevřená plocha [1]. Požární uzavřenost obvodových plášťů je zkoušena na vzorcích instalovaných vnější stranou pláště směrem do pece. Při takto instalovaném vzorku lze zkoušet

pouze požární odolnost z vnější strany. Z důvodu vysoké ceny není tento způsob zkoušení prováděn často. Zkoušeny jsou např. obvodové stěny dřevostaveb.

Požární odolnost je definována jako doba, po kterou je stavební konstrukce nebo požární uzávěr schopen odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce především zachování nosnosti, celistvosti a izolační schopnosti [1]. Základní klasifikační doby jsou 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut. Požární odolnost se zapisuje ve formě jednoho nebo více mezních stavů, klasifikační doby a druhu konstrukční části; např. REI 30 DP3, EW 15 DP1 apod. Požární odolnost lze stanovit normovou hodnotou (tabulky, výpočet dle Eurokódu), požární zkouškou nebo kombinací výpočtu a zkoušky.

Zkouška požární odolnosti se provádí v požárních pecích za účinku teplot plně rozvinutého požáru na vzorcích obvykle 3 x 3 m. Nejčastěji je při zkoušce použita normová teplotní křivka. Obvodové stěny či jejich části se mohou zkoušet i na účinek vnějšího požáru podle křivky vnějšího požáru, která má omezenou teplotu vlivem ochlazování vnějším prostředím. Nejčastěji používané průběhy teplot v peci při požárních zkouškách jsou vykresleny na následujícím grafu [19].



graf 1 Základní 2 průběhy teplot v peci při zkouškách požární odolnosti stavebních konstrukcí [19]

Zkouška je prováděna v peci s kapalným nebo plynným palivem. Pec musí zajistit normové podmínky požárního namáhání s ohledem na tepelné působení a tlak. Pec je konstruována tak, aby byla schopna ohřívat svíslé nebo vodorovné prvky ať už z jedné nebo více stran (stěny, stropy, sloupy a nosníky). V některých pecích je možné instalovat více zkoušených soustav za předpokladu splnění požadavků pro jednotlivé vzorky [20].

Součástí pece jsou zkušební rámy pro vyvození okrajových podmínek, do kterých se vkládají zkušební vzorky. Zkušební rám se vzorkem je zatěžován dle druhu konstrukce zatěžovacím zařízením. Při zkoušce jsou instalovány přístroje na měření [20]:

- teploty (termočlánky uvnitř pece, články na neohřívaném povrchu vzorku, články měřící teplotu okolí vně pece);

- tlaku v peci;
- deformace vzorku (mechanická, optická nebo elektronická technika);
- celistvosti vzorku (bavlněný polštářek, měrky spár);
- přesnosti měřícího zařízení.

Při zkoušce požární odolnosti obvodové stěny je instalován vzorek o maximálním rozměru 3x3 m. Skladba a navržené spoje musí odpovídat konstrukci, která bude používána v praxi. Dále musí být napodobeny podmínky podepření a zatížení konstrukce. Z hlediska podepření, norma přesně stanovuje postup v případě, je-li vzorek menší než zkušební rám. Zatížení na stěnu je umístěno v horní nebo spodní části zkušebního rámu (vyznačení zatěžovacích lisů na obr. 13) [21].



obr. 13 Zkouška požární odolnosti nosné dřevěné obvodové stěny: pohled na vzorek (3 × 3 m) nastrojený mnoha povrchovými termoelektrickými články (mezní stav I); barevně vyznačeny zatěžovací lisy [19]

Pro každou zkoušku je vytvořen protokol s naměřenými hodnotami a výsledky zkoušky. V případě měření radiace je v každém stanoveném místě měření zaznamenán okamžik, kdy naměřený tepelný tok překročí hodnotu 5, 10, 15, 20 a 25 kW.m⁻². Také je nutno uvést, zda se tak stalo na základě průměrné nebo nejvyšší úrovně radiace.

2.3 Měření při požárních zkouškách

Při požárních zkouškách je možné měřit značné množství dat. Měřené hodnoty jsou porovnávány s modely a dalšími zkouškami. Mezi měřené parametry patří např. teplota, tepelný tok, rychlost proudění vzduchu, koncentrace kyslíku, množství CO a CO₂, úbytek hmotnosti a další.

2.3.1 Měření teplot

Teplota je mírou kinetické energie pohybujících se částí látky a ovlivňuje téměř všechny děje v přírodě. Teplotu můžeme měřit dotykově nebo bezdotykově.

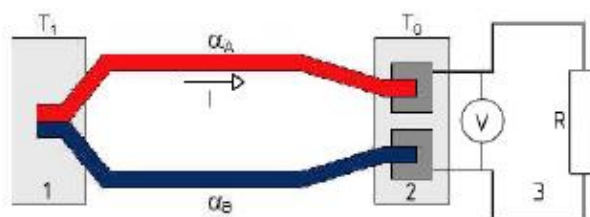
Dotyková teplotní čidla jsou v přímém kontaktu s měřeným povrchem. Způsob připevnění k měřenému povrchu nesmí ovlivnit měření a čidlo musí mít dobrý kontakt s povrchem. Pro měření v požárních pecích se používají především termočlánky.

Bezdotykové měření využívá vyzařování infračerveného záření³ [22]. Záření je elektronicky zpracováno a výstupem je údaj na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení. Pro bezdotykové měření je nutné znát emisivitu⁴ [23] měřeného objektu. Pro měření teplot při požárních zkouškách lze využít termokamery [24].

Termočlánky

Termočlánek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na koncích vodivě spojeny. Jeden vodič je měřící a druhý srovnávací. Princip termočlánku (obr. 14) spočívá v rozdílu teplot jednotlivých vodičů. Jestliže se liší teplota jednoho spoje od teploty druhého spoje, vznikne termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud [25].

Pro správnou funkčnost termočlánku je teplota srovnávacího spoje držena na konstantní hodnotě. Kolísání teploty lze předcházet umístěním spoje do termostatu nebo instalací kompenzačního obvodu. Termočlánky jsou umístěny v ochranném obalu, který zabraňuje mechanickému poškození a chrání je před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy okolí. Obal je zakončen přírubou se svorkovnicí a vývody.



obr. 14 Princip termočlánku: 1 – měřící spoj; 2 – srovnávací spoj; 3 – kompenzační obvod; α_A , α_B – dva vodiče s různým termoelektrickým součinitelem [25]

Materiál termočlánku musí mít lineární přírůstek termoelektrického napětí a závislosti na teplotě a stabilitě při dlouhodobém provozu. Označení termočlánků je normalizováno dle ČSN EN 60 584-1 (tab. 4). V České republice jsou nejvíce používány termočlánky typu J, K, S a B.

³ Infračervené záření je neviditelná část elektromagnetického spektra projevující se tepelnými účinky

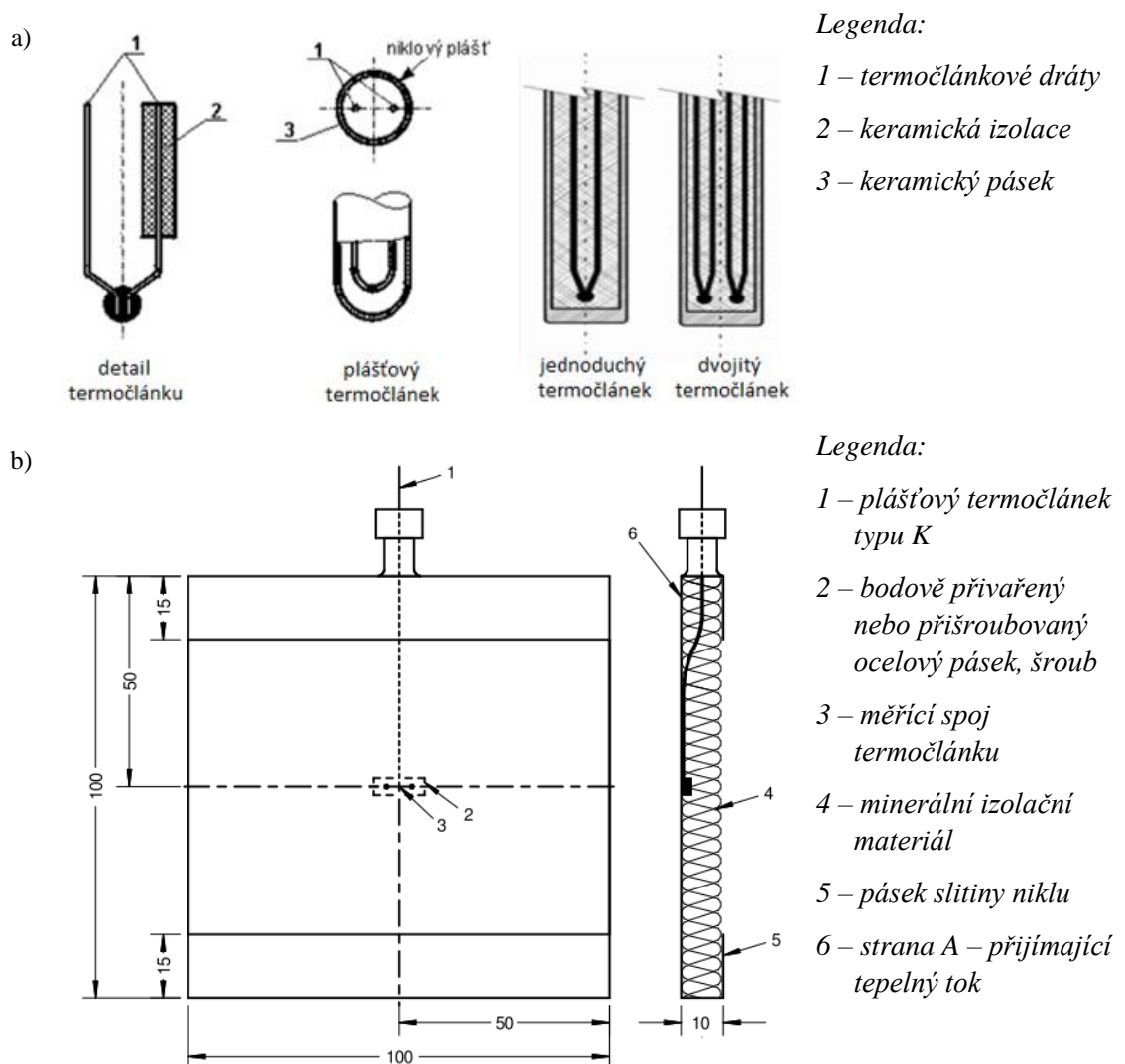
⁴ Emisivita je podíl tepelné energie vyzařené konkrétním reálným povrchem k energii vyzařené povrchem stejných rozměrů a teploty (= schopnost povrchu odrážet tepelný paprsek). Tato veličina může dosáhnout hodnot od 0 do 1 v závislosti na struktuře materiálu povrchu, teplotě povrchu, vlnové délce a směrových podmínkách.

tab. 4 Označení nejčastěji používaných termočlánků dle ČSN EN 60 584-1 [26]

Označení	Materiál termočlánku	Doporučený rozsah teplot
typu T	měď – konstantan (Cu-CuNi)	200 až 300°C
typu J	železo – konstantan (Fe-CuNi)	400 až 750°C
typu E	chromel – konstantan (NiCr-CuNi)	440 až 800°C
typu K	chromel – alumet (NiCr-NiAl)	750 až 1200°C
typu S	platinarhodium – platina (Pt10Rh-Pt)	1400 až 1600°C
typu R	platinarhodium – platina (Pt13Rh-Pt)	1400 až 1600°C
typu B	platinarhodium – platinarhodium (Pt13Rh-Pt6Rh)	1500 až 1700°C

Termoelektrických snímačů je celá řada. Pro měření teplot v požárních pecích jsou nejvíce používány tyto snímače teploty:

- plášťové termočlánky (obr. 15a),
- deskové termočlánky (obr. 15b).



obr. 15 Konstrukce termočlánků: a) plášťového termočlánku [27]; b) deskového termočlánku [20]

V závislosti na druhu zkoušky jsou stanoveny umístění jednotlivých termočlánků. Snímače se umisťují:

- do prostoru pece, příp. modelované místnosti;
- na povrch vzorku;
- dovnitř vzorku, mezi jednotlivé vrstvy.

Termokamery (infrakamery)

Termokamery pracují na principu termografie. Jedná se o metodu zobrazování teplotních polí na povrchu snímaných těles. Zdrojem tepla je každý objekt s teplotou vyšší než absolutní nula. Takovéto těleso vyzařuje dlouhovlnné infračervené záření, které je termokamerou snímáno a zobrazeno v závislosti na čase.

Infrakamery přemění neviditelný reliéf teplotního pole na povrchu snímaného objektu na viditelný obraz (monitor zařízení). Kamera se skládá z objektivu a detektorů infračerveného záření. Objektiv zobrazuje snímanou scénu do obrazové roviny. Detektor snímá signál radiálního toku z měřeného objektu. Energie je dále převáděna na analogový signál, který je digitalizován. Výsledkem je digitální obraz s množstvím snímků proměnných v čase [22]. Použití tohoto způsobu měření při hodnocení požární uzavřenosti by bylo možné v případě vygenerování teplot v určených bodech a následný výpočet pomocí hustoty tepelného toku (Rovnice 2).

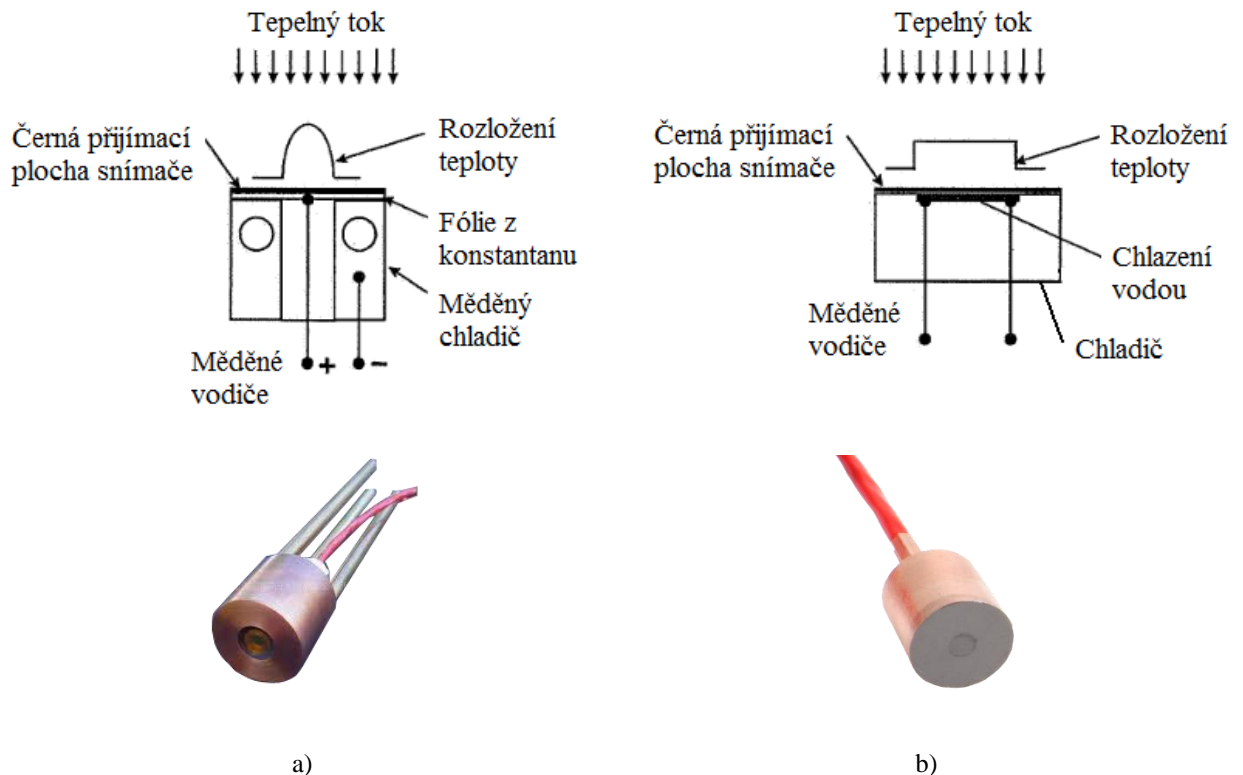
2.3.2 Měření tepelného toku

Tepelný tok je energie předávaná částicemi teplejšího tělesa částicím chladnějšího tělesa [28]. K předávání energie dochází vedením, prouděním a sáláním. Pro klasifikaci požární uzavřenosti je důležitým parametrem hustota tepelného toku z hořící plochy. Hodnoty lze měřit v závislosti na čase pomocí radiometrů.

Radiometr

Radiometr je přístroj na měření elektromagnetického záření, které je založené na tepelném působení [29]. Druh radiometru závisí na druhu proudění tepelného toku, které dopadá na snímací plochu. Snímací zařízení pracují na principu snímání radiálního nebo axiálního tepelného toku. V praxi se používají dva typy snímačů:

- Gardonův snímač (viz obr. 16a);
- Schmidt-Boelterův snímač (viz obr. 16b).



obr. 16 Snímače tepelného toku (zdroj: obrázky nahoře [30], obrázky dole www.sequoia.co.uk):
 a) Gardonův snímač; b) Schmidt-Boelterův snímač

Gardonův snímač využívá radiální teplo. Součástí senzoru je kruhová fólie z konstantanu⁵, která je připojená na vnější okraj k ochlazovanému měděnému chladiči. Tepelný tok na povrchu senzoru proudí radiálně, čímž dochází k parabolickému rozložení teploty na povrchu snímače. Tento druh radiometru je nepřetržitě chlazen vodou. Typický průměr těla je 25 mm.

Snímač Schmidt-Boelter pracuje na principu axiálního jedno-rozměrového tepelného toku, v důsledku toho teplota na povrchu rozložena rovnoměrně. Radiometr pro určení množství dopadajícího tepelného toku využívá hodnotu teplotního rozdílu z teplot měřených před a za přijímací plochou snímače, která je tvořena tenkou tepelně izolační vrstvou. Snímač je chlazen vodou a je omezen maximální teplotou 200°C na povrchu. Průměr těla radiometru se pohybuje v rozmezí 3 až 12 mm.

⁵ Konstantan je slitina mědi a niklu s přídavkem manganu.

3 Experiment 1 – zkouška dřevovláknité desky s omítkou v kónickém kalorimetru

V rámci diplomové práce byla provedena malorozměrová zkouška ISO 5660-1 v kónickém kalorimetru na vzorcích dřevovláknité desky s omítkou od firmy TFH dřevěné skeletové domy s.r.o.. Důvodem zkoušky části skladby dřevěné obvodové stěny druhu DP3, je snaha o klasifikaci stěny jako požárně uzavřené plochy, resp. částečně požárně otevřené plochy, a to alternativní metodou, která není pro tento účel v současné době používána. Klasická skladba obvodové stěny je znázorněna na obr. 17, přičemž byla zkoušena pouze omítnutá dřevovláknitá izolační deska.



obr. 17 Skladba obvodové stěny TFH [31]

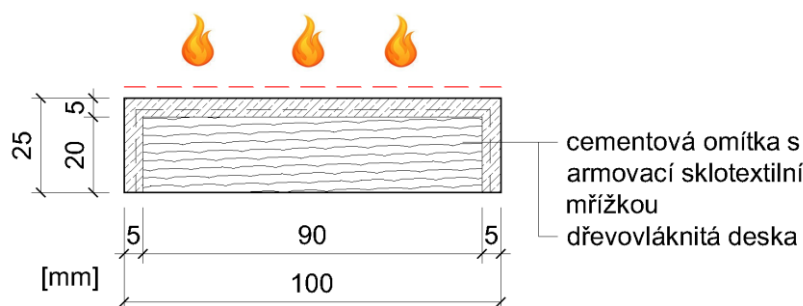
3.1 Zkušební vzorky

Pro účel zkoušky bylo vyrobeno 6 vzorků o velikosti 100 x 100 mm a celkové tloušťce 25 mm (obr. 18 a obr. 19). Vzorky se skládají ze 2 vnějších vrstev obvodového pláště:

- tuhá dřevovláknitá desky tl. 20 mm;
- tenkovrstvá omítky na cementové bázi tl. 5 mm se sklotextilní mřížkou.

Pro zkoušku byla použita tuhá dřevovláknitá izolační deska STEICO protect. Jedná se o voděodolný, difúzně otevřený deskový prvek. Deska má dle EN 13501-1 třídu reakce na oheň E. Dřevovláknitá deska je určena pro omítkové zateplovací systémy dřevostaveb [32].

Vzorky jsou ručně omítnuty lehčenou minerální lepící stěrkou Baumit StarContact Forte. Jedná se o cementovou omítku s vloženou výztužnou vrstvou (sklotextilní mřížka). Lepící a stěrková hmota je používána v zateplovacích systémem [33].



obr. 18 Schematický řez vzorkem s vyznačením teplotního namáhání



a)



b)

obr. 19 Zkušební vzorek: a) exponovaný povrch vzorku; b) neexponovaný povrch vzorku

3.2 Specifikace použitých zařízení

Před začátkem zkoušky kónickým kalorimetrem v TÚPO HZS ČR bylo potřeba stanovit potřebnou teplotu zářiče. Byla provedena zkouška, při které se měřila teplota na povrchu zkušebního tělesa v závislosti na teplotě zářiče. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5. V tabulce je dále uvedeno potřebné elektrické napětí pro zářič U [mV] a hustota tepelného toku od zářiče Q [kW.m⁻²]. Pro samotnou zkoušku vzorků z dřevovláknité desky byla zvolena hodnota hustoty tepelného toku 50 kW.m⁻².

tab. 5 Určení teploty na povrchu vzorku (zdroj: Ing. Libor Ševčík, TÚPO HZS ČR)

$T_{\text{zářiče}} [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$	$Q [\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}]$	$T_{\text{povrchu}} [^{\circ}\text{C}]$
20	0	0	21
200	0,34	1,95	62
400	1,50	8,88	193
600	4,22	25,12	318
670	5,85	34,87	399
755	8,38	49,97	449
800	9,94	59,29	502
850	11,98	71,47	545

3.3 Průběh zkoušky

Měření probíhala v Technickém ústavu požární ochrany (TÚPO HZS ČR) v Praze 4 – Modřanech pod vedením Ing. Libora Ševčíka. V tomto zařízení se nachází jediný kónický kalorimetr v Praze (obr. 20). Před začátkem zkoušky byly provedeny úkony pro správné zapnutí systému kalorimetru:

- zapnutí a kalibrace analyzátoru kyslíku na koncentraci 20,95%;
- zapnutí a kalibrace váhy na nulovou hodnotu;
- zapnutí jednotky sběru dat;
- připravení vzorku na zkoušku (obalení neexponovaných povrchů hliníkovou fólií a vložení do rámečku).



a)



b)

obr. 20 Kónický kalorimetr v Technickém ústavu požární ochrany HZS ČR v Praze: a) pohled na kónický kalorimetr; b) popis na kónický zářič, váhy a držák vzorku

Horní povrch zkušební vzorku musí lícovat s horní hranou držáku. Jelikož má zkušební vzorek tloušťku 25 mm, je pod vzorek v upevňovacím rámečku vložena minerální vata. Váha v kalorimetru je kalibrována s upevňovacím rámečkem obsahující minerální vatu.

Všechny vzorky byly testovány při standartní teplotě hustoty tepelného toku $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Dle normy je provedeno měření na třech vzorcích. V případě jednoho ze vzorků došlo k výchylce uvolňovaného tepla q''_{300} a výhřevnosti $\Delta h_{c,\text{eff}}$ o více než 10 %. Měření bylo proto opakováno u dalších dvou vzorků. Při zkoušce bylo zkoušeno 5 vzorků, z nichž byly tři vybrány.

Jeden ze zbylých vzorků byl rozříznut po ukončení zkoušky. První polovina vzorku byla při chladnutí otočena neomítnutou stranou nahoru, druhá část vzorku neomítnutou stranou dolů. Na obr. 21 je viditelné žhnutí dřevovláknité desky pod omítkou.



a)

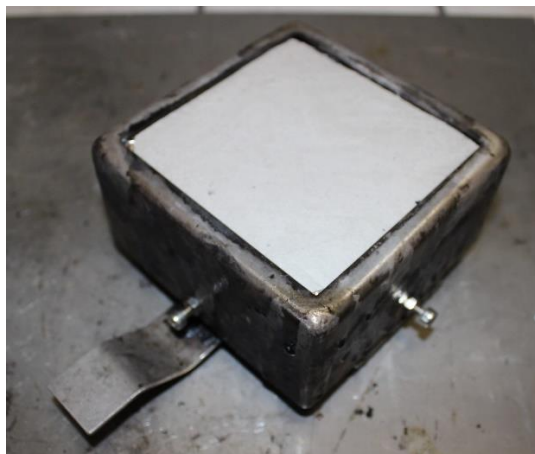


b)

obr. 21 Vzorek: a) první část vzorku s neomítnutou stranou směrem nahoru; b) druhá část vzorku s neomítnutou stranou směrem dolů

Vzorek 1

Ke vzplanutí vzorku došlo cca v 9. minutě, od této doby začala růst rychlost uvolněného tepla až k hodnotě cca $55 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Konec hoření bylo zaznamenáno cca v 21,5. minutě od začátku zkoušky. Při zkoušce v kónickém kalorimetru došlo k úbytku hmotnosti o cca 31 g a po ukončení zkoušky se hmotnost nadále snižovala. Po testu byl vzorek umístěn na kontrolní váhu na izolační podložku (deska z minerální vaty) neomítnutou stranou směrem dolů (obr. 22).



a)



b)



c)

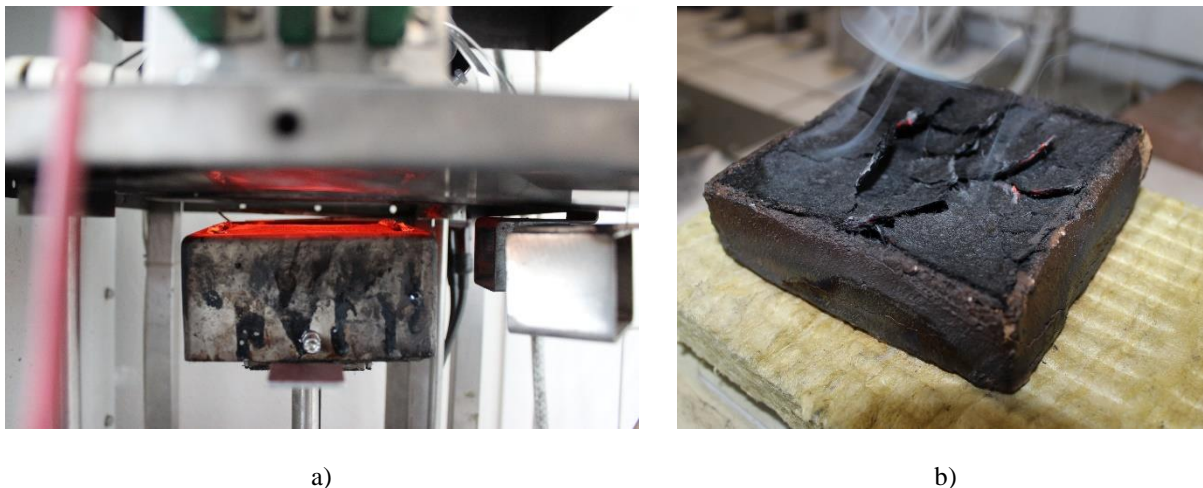


d)

obr. 22 Vzorek 1: a) vzorek před zkouškou v upevňovacím rámečku; b) ozařování vzorku kónickým zářičem; c) hoření vzorku v kalorimetru; d) vzorek po testu

Vzorek 2

Ke vzplanutí vzorku došlo cca v 11,5. minutě, od této doby začala růst rychlost uvolněného tepla až k hodnotě cca $40 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Konec hoření bylo zaznamenáno cca v 23,5. minutě od začátku zkoušky. Při zkoušce v kónickém kalorimetru došlo k úbytku hmotnosti o cca 31 g a po ukončení zkoušky se hmotnost nadále snižovala. Po testu byl vzorek umístěn na kontrolní váhu neomítnutou stranou směrem nahoru (obr. 23).



obr. 23 Vzorek 2: a) upevnění vzorku v kalorimetru b) vzorek po testu

Vzorek 3

Ke vzplanutí vzorku došlo cca v 12. minutě, od této doby začala růst hustota tepelného toku až k hodnotě cca $40 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Konec hoření bylo zaznamenáno cca v 25. minutě od začátku zkoušky. Při zkoušce v kónickém kalorimetru došlo k úbytku hmotnosti o cca 31 g a po ukončení zkoušky se hmotnost nadále snižovala. Po testu byl vzorek umístěn na kontrolní váhu neomítnutou stranou směrem nahoru. Na obr. 24 je viditelná deformace dřevovláknité desky s omítkou po zkoušce.



obr. 24 Vzorek 3: viditelná deformace dřevovláknité desky s omítkou po zkoušce

3.4 Diskuze získaných výsledků

Celkové výsledky zkoušky dřevovláknité desky s omítkou jsou shrnuty v tab. 6. Hodnoty počáteční hmotnosti jsou uvedeny z doby vzplanutí vzorku – v čase t_{ign} [s].

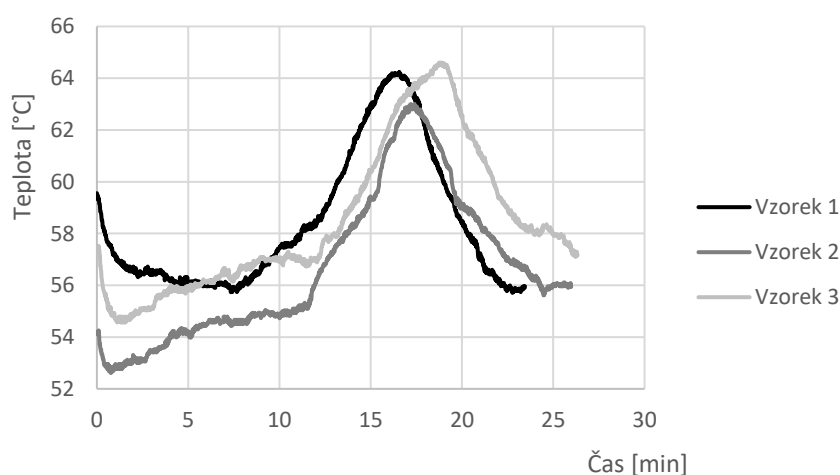
tab. 6 Celkové výsledky zkoušky dle ISO 5660-1

veličina	1	2	3
m_i [g]	129,9	138,9	137,5
m_e [g]	111,1	112,9	108,0
m''_{i-e} [g.m ⁻² .s ⁻¹]	2,6	3,6	4,1
t_{ign} [s]	541	704	734
t_{celk} [s]	1373	1525	1546
q''_{celk} [MJ.m ⁻²]	13,6	9,5	6,9
q''_{max} [kW.m ⁻²]	55,4	40,7	40,9
q''_{180} [kW.m ⁻²]	12,8	13,7	9,5
q''_{300} [kW.m ⁻²]	18,1	22,1	18,1
$\Delta h_{c,eff}$ [MJ.kg ⁻¹]	6,4	3,2	2,1

Legenda: m_i - počáteční hmotnost; m_e - koncová hmotnost; m''_{i-e} - průměrná rychlost úbytku hmotnosti; t_{ign} - čas po vzplanutí vzorku; t_{celk} - délka trvání zkoušky; q''_{celk} - celkové uvolněné teplo (THR); q''_{max} - maximální dosažená hodnota rychlosti uvolňování tepla (HRR); q''_{180} - průměrná hodnota rychlosti uvolňování tepla HRR po dobu 180 s; q''_{300} - průměrná hodnota rychlosti uvolňování tepla HRR po dobu 300 s; $\Delta h_{c,eff}$ - efektivní výhřevnost

Průběh teploty v odtahovém potrubí

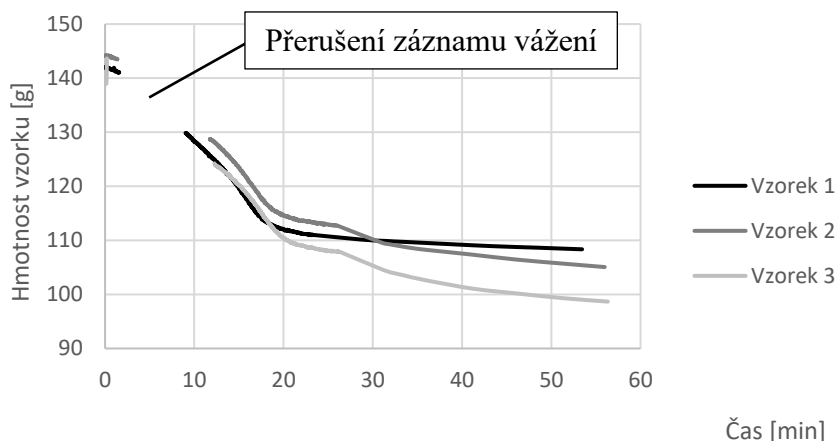
Během zkoušky byly měřeny hodnoty teplot v odtahovém potrubí. Porovnání průběhu teplot v odtahovém potrubí jednotlivých zkoušených vzorků zobrazuje následující graf 2.



graf 2 Porovnání průběhů teplot v odtahovém potrubí v závislosti na čase

Úbytek hmotnosti

Hodnoty počáteční hmotnosti jsou uvedeny z doby vzplanutí vzorku – v čase t_{ign} [s] (tab. 6). Při zkoušce před zahořením vzorku došlo k přerušení vážení hmotnosti vzorku (graf 3), jelikož během zkoušky vzorek zvětšil svůj objem. Horní povrch vzorku se opřel o piezoelektrický zapalovač a tím došlo k přetížení. Vážení pokračuje v době zahoření vzorku, kdy byl zapalovací zdroj odstraněn. Dále dochází k mírnému úbytku hmotnosti, a to jak v době hoření, tak i po ukončení zkoušky v kalorimetru, kdy dřevovláknitá deska uvnitř vzorku dohořívá.



graf 3 Úbytek hmotnosti vzorku v průběhu zkoušky

V průběhu zkoušky je úbytek hmotnosti všech vzorků podobný, pohybuje se okolo 31 g. Při vážení po zkoušce jsou patrné rozdíly. Vzorek je sledován 26 minut po ukončení zkoušky. V závislosti na otočení vzorku na váhu jsou patrné rozdíly v úbytku hmotnosti pro jednotlivé vzorky (tab. 7). V případě styku neomítnuté strany vzorku se vzduchem je úbytek hmotnosti 2,5 až 3 krát vyšší než u vzorku s neomítnutou stranou položenou na minerální vatu.

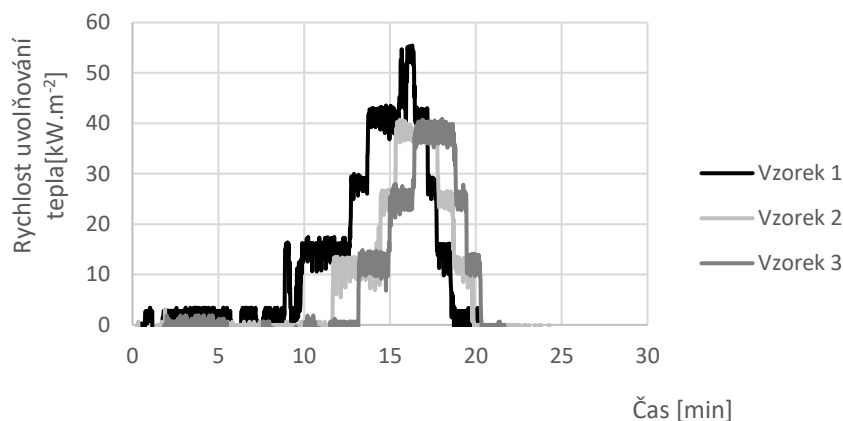
tab. 7 Úbytek hmotnosti u vzorků při a po zkoušce

Číslo vzorku	Úbytek hmotnosti při zkoušce [g]	Umístění vzorku na váhu	Úbytek hmotnosti po zkoušce [g]
1	31,0	neomítnutá strana směrem DOLŮ (styk dřevovláknité desky izolací z minerální vaty)	1,8
2	31,3	neomítnutá strana směrem NAHORU (styk dřevovláknité desky se vzduchem)	4,5
3	31,2	neomítnutá strana směrem NAHORU (styk dřevovláknité desky se vzduchem)	5,8

Rychlost uvolňování tepla (HRR)

Všechny zkoušené vzorky se po 9. minutě vznítily a začaly uvolňovat značné množství tepla. Hoření probíhalo na okraji vzorků. Zřejmě došlo k hoření plynů unikajících ze spodní neomítnuté strany vzorku, jelikož omítka na vzorcích nepopraskala. U měření rychlosti uvolněného tepla je

do 23. minuty podobný průběh u všech vzorků (graf 4). Větší rozdíl se nachází u vzorku 1, který začal hořet o 2,5 minuty dříve než vzorky 2 a 3.



graf 4 Rychlost uvolňování tepla (HRR)

Maximální hodnoty rychlosti uvolňování tepla jsou uvedeny v tab. 6: 55,4 kW.m⁻² pro vzorek 1, 40,7 kW.m⁻² pro vzorek 2 a 40,9 pro vzorek 3. Tyto hodnoty rychlosti uvolněného tepla jsou vyšší než 15 kW.m⁻² (tab. 2), z tohoto důvodu nelze skladbu začlenit jako požárně uzavřenou plochu.

3.5 Závěr malorozměrové zkoušky

Pro malorozměrovou zkoušku kónickým kalorimetrem bylo vyrobeno 6 vzorků z dřevovláknité desky s cementovou omítkou. Důvodem zkoušky bylo zhodnocení míry požární otevřenosti, resp. uzavřenosti obvodové stěny dřevostavby (konstrukci DP3) v případě splnění požární odolnost stěny.

Vzorky byly vystaveny tepelnému toku 50 kW.m⁻² a začaly hořet po 9. minutě začátku zkoušky. Byla stanovena maximální hodnota rychlosti uvolněného tepla vyšší než 15 kW.m⁻² a nižší než 60 kW.m⁻², proto je skladba klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha. Zároveň je nutné dodat, že při prohlídce ohořelých vzorků nebyly patrné trhliny na omítce. Vystává otázka, zda by došlo k vzplanutí v případě úpravy vzorku, např. omítnutím dřevovláknité desky ze všech stran nebo přidáním nehořlavého materiálu z vnitřní strany.

Myslím si, že určení požární uzavřenosti jen na základě výsledků z kónické kalorimetrie není úplně vhodné. Pokud by výsledné hodnoty rychlosti uvolněného tepla byly z rozmezí mezních hodnot částečně požárně otevřené plochy nebo by se blížily mezní hodnotě požárně uzavřené plochy, mohla by být tato zkouška motivací k zhotovení středně nebo velkorozměrové zkoušky.

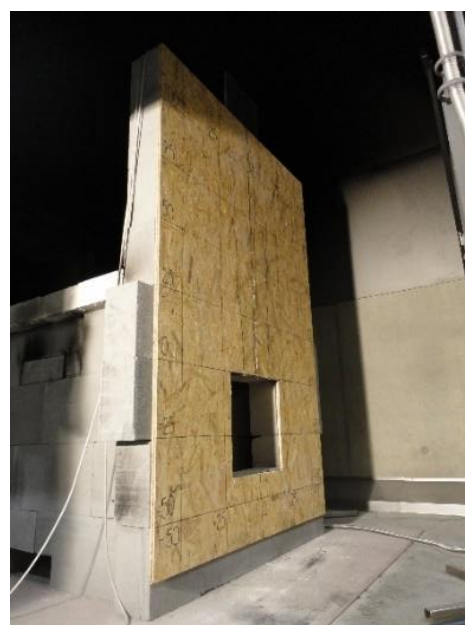
4 Experiment 2 – alternativní zkouška požární uzavřenosti

Zkušební metodika pro určení požárně otevřených a uzavřených ploch není definována. Při tomto experimentu je navržena alternativní možnost zkoušení požární uzavřenosti stěn. Pro účely diplomové práce byla navržena a postavena požární pec z pórobetonových tvárnic a překladů. Byly provedeny dvě zkoušky pro porovnání chování konstrukce bez úpravy a konstrukce s hořlavou povrchovou úpravou:

- referenční zkouška bez hořlavého obkladu (viz obr. 25a);
- modifikovaná zkouška pece s hořlavým obkladem (viz obr. 25b).



a)



b)

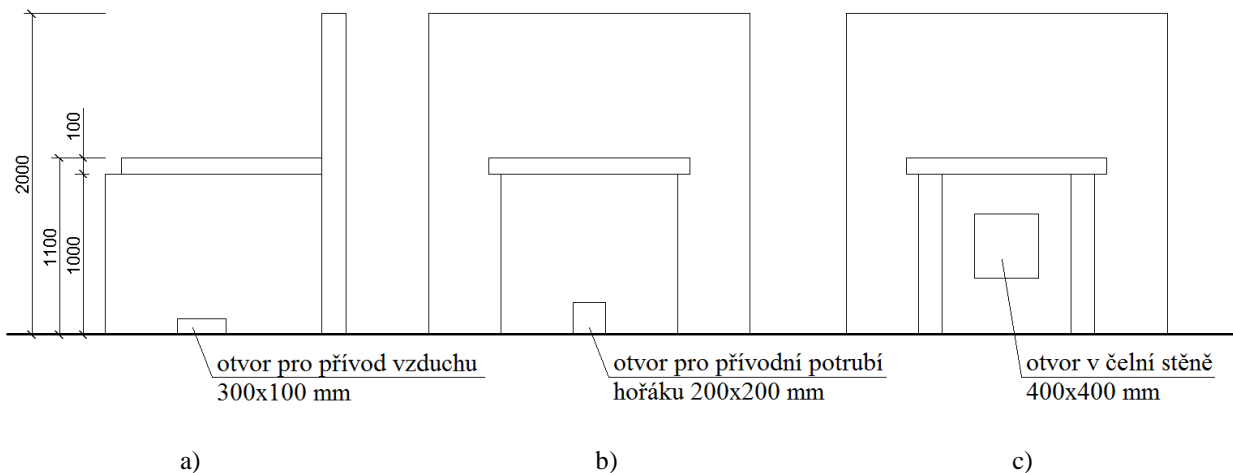
obr. 25 Požární pec: a) referenční pec; b) modifikovaná pec s hořlavým obkladem.

Pro oba typy zkoušek je vytvořen matematický CFD model. Při vytváření modelu jsou použity materiály a parametry, které se vyskytují v jednotlivých zkouškách v požárních pecích. Snahou modelů je přiblížení se reálné zkoušce. V případě úspěchu by mohla modelovaná pec sloužit jako impuls pro efektivnější zkoušení skladeb s ohledem na požární uzavřenost a další parametry požární bezpečnosti.

4.1 Referenční zkouška

Základní vnitřní rozměry zkušební pece jsou 0,8 x 1,2 m, světlá výška je 1,0 m. Pro stěny jsou použity pórobetonové tvárnice PORFIX 500 x 250 x 150 mm a nenosné překlady YTONG NEP 10 délky 1250 mm (rozměr 100 x 250 x 1250 mm). V bočních stěnách jsou navrženy dva otvory

pro přívod vzduchu o velikosti 0,3 x 0,1 m u podlahy. V zadní části pece je u podlahy otvor o velikosti 0,2 x 0,2 m pro přívodní potrubí k plynovému hořáku. Velikost přední stěny pece je 1,25 x 2,0 m. Uprostřed přední stěny je umístěn otvor o velikosti 0,4 x 0,4 m ve výšce 0,35 m od podlahy (obr. 26).

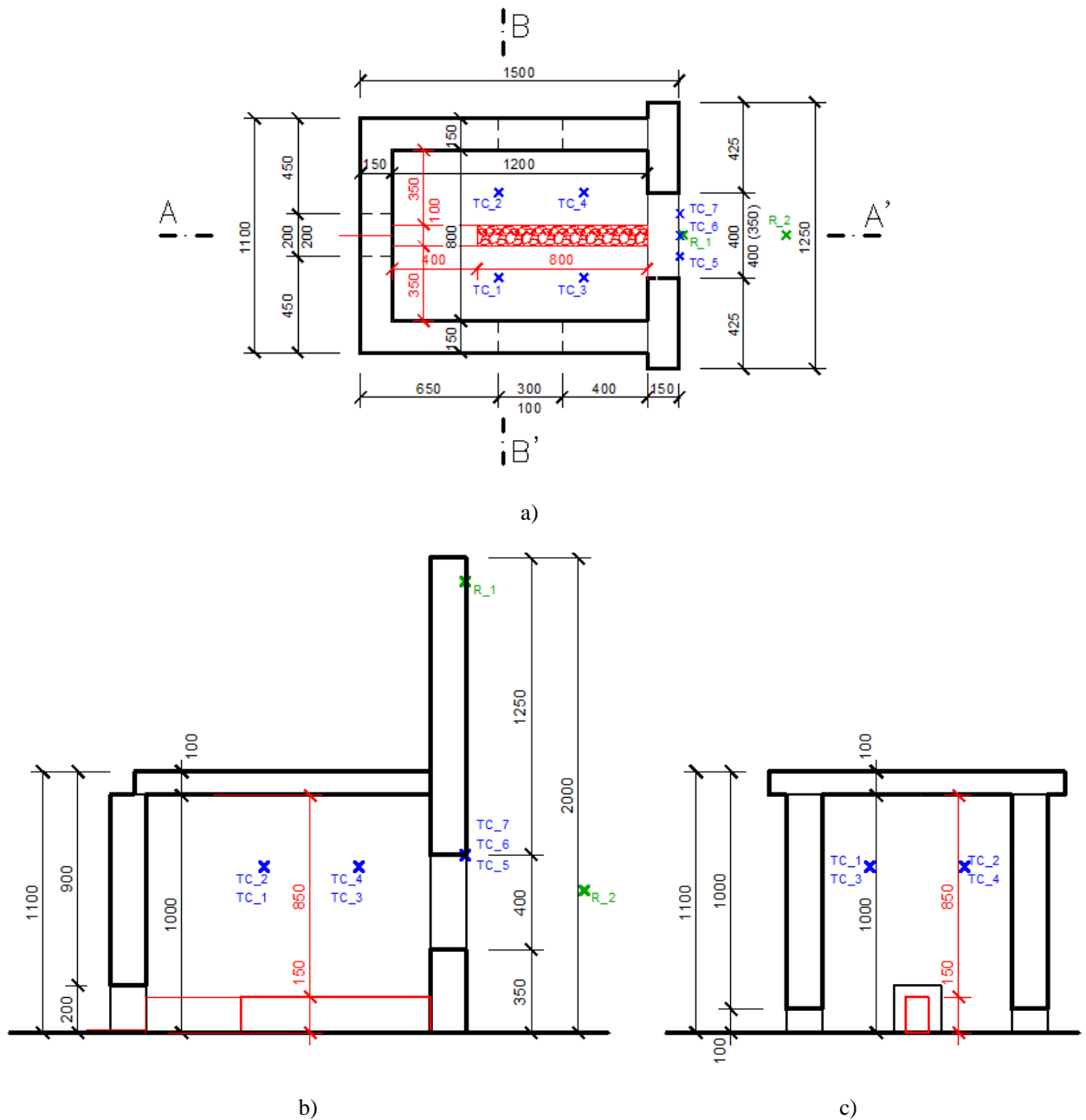


obr. 26 Rozmístění otvorů v požární peci: a) boční pohled; b) zadní pohled; c) čelní pohled

Uvnitř pece je umístěn plynový hořák o rozměru 1,2 x 0,1 x 0,15 m (obr. 27). Hořící plocha na hořáku je o velikosti 0,8 x 0,1 m s maximálním výkonem 150 kW v 15. minutě. Snahou je dosáhnout normové teplotní křivky uvnitř pece.

Uvnitř pece jsou symetricky umístěny čtyři termo-elektrické plášťové články typu K o průměru 2 mm pro měření teploty uvnitř pece. Pro měření teplot horkých plynů, které unikají z vnitřního prostoru, jsou na horní vnější hraně nadpraží umístěny tři termo-elektrické články – uprostřed je termo-elektrický plášťový článek typu K o průměru 2 mm; po stranách jsou kabelové termo-elektrické články typu K průměru 0,5 mm s měděným terčíkem. Termočlánek s měděným terčíkem je obvykle používán k měření povrchových teplot, v experimentu byly tyto termočlánky použity z důvodu nedostatku termo-elektrických plášťových článků v laboratoři. Umístění zařízení je vyznačeno na obr. 27.

Pro měření tepelného toku byly umístěny dva vodou chlazené radiometry Schmidt-Boelter typu HEKSEFLUX SBG01. Nad otvorem ve výšce 2,0 m nad podlahou je umístěn radiometr s měřicím rozsahem 0–50 kW.m⁻². Ve vzdálenosti 0,5 m od otvoru je výšce 0,6 m nad podlahou umístěn druhý radiometr s měřicím rozsahem 0–20 kW.m⁻². Umístění zařízení je vyznačeno na obr. 27.



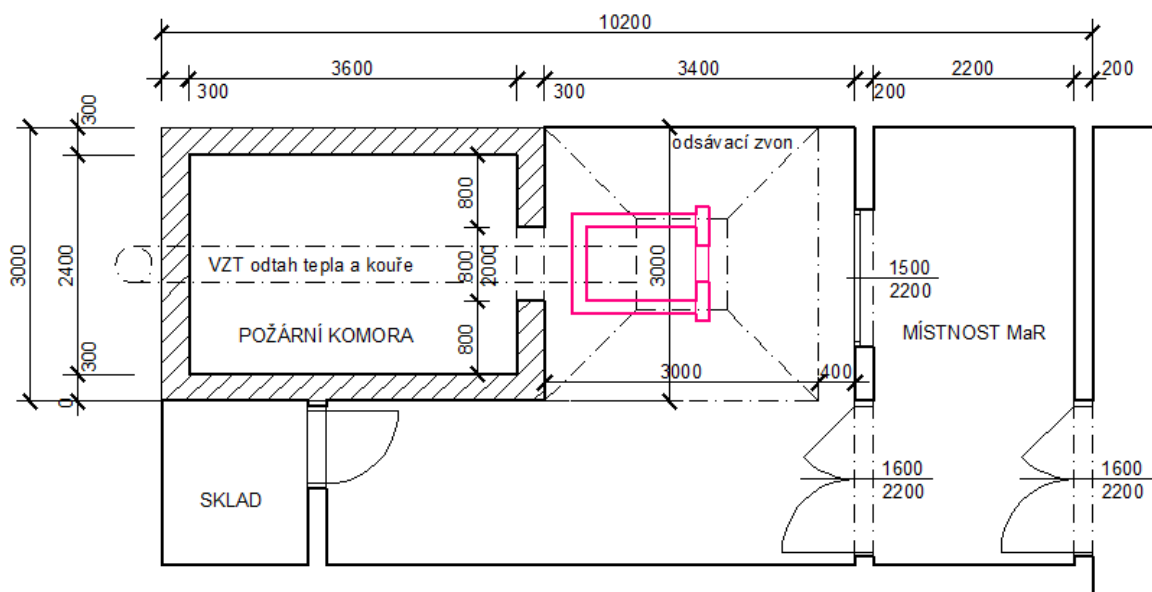
Legenda: TC – termočlánky (modře, TC₁ – TC₇); R – radiometr (zeleně, R₁ a R₂)

obr. 27 Referenční pec z nehořlavých materiálů: a) půdorys; b) podélný řez A; c) příčný řez B

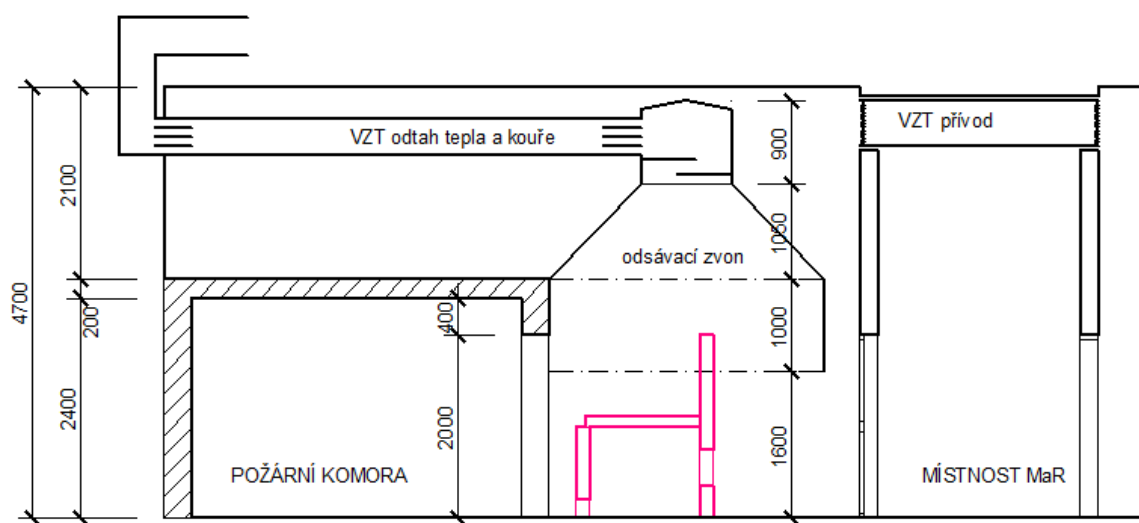
4.1.1 Průběh experimentu s referenční pecí

Experiment byl uskutečněn v požární laboratoři „FireLAB“ Univerzitního centra energeticky efektivních budov - UCEEB ČVUT v Buštěhradě. V laboratoři je požární komora s měřicím a regulačním zařízením pro velkorozměrové požární zkoušky, které analyzují reakci na oheň povrchových úprav stěn a stropů, samostatně hořící předměty umístěných uvnitř či vně komory (tzv. „nábytkový“ kalorimetr) nebo konstrukční prvky vystavené lokálnímu požáru. Sledování průběhu zkoušky je skrz žáruvzdorné prosklené dveře a okno z místnosti měření a regulace

(místnost MaR). Navržená referenční pec je umístěna vně požární pece pod odsávací zvon (obr. 28).



a)



b)

obr. 28 Požární laboratoř 'FireLAB' na UCEEB ČVUT v Buštěhradu s polohou referenční pece:
a) půdorys; b) řez

Před zkouškou byla provedena kalibrace měřících zařízení v odtahovém potrubí – množství CO / CO_2 a dusíku. Dalším úkonem byla zkouška funkčnosti plynového hořáku, kdy byl zkušební puštěn plyn. V první fázi je spuštěno větrání a pojistný hořák. Plyn do hořáku v referenční peci je vpuštěn až po zapálení pojistného hořáku⁶. Výkon hořáku je regulován dle matematického modelu

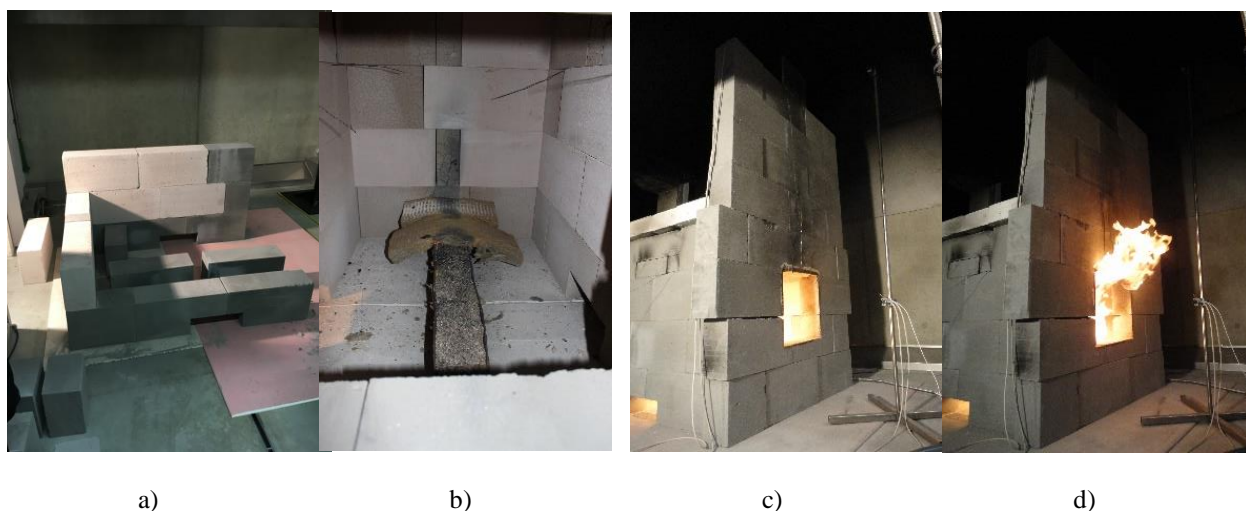
⁶ Funkce pojistného hořáku je čistě bezpečnostní – v případě uhasnutí plamene ve zkušebním hořáku dojde k uzavření přívodu plynu k hořáku.

tak, aby průběh teplot v peci byl podobný jako normová teplotní křivka. Průběh experimentu je popsán v tab. 8.

tab. 8 Průběh experimentu referenční pece

Čas (s)	Čas (min)	Specifikace
-	-	Postavení pece z pórobetonových tvárnic (obr. 29a)
-	-	Zapnutí měřících zařízení, zhotovení prvotní fotodokumentace
0	0	Spuštění hořáku – 30 kW (viz. obr. 29c)
30	0,5	První vyšlehnutí plamenů otvorem pece
1200	20	Vypnutí hořáku
1380	23	Ukončení záznamu dat

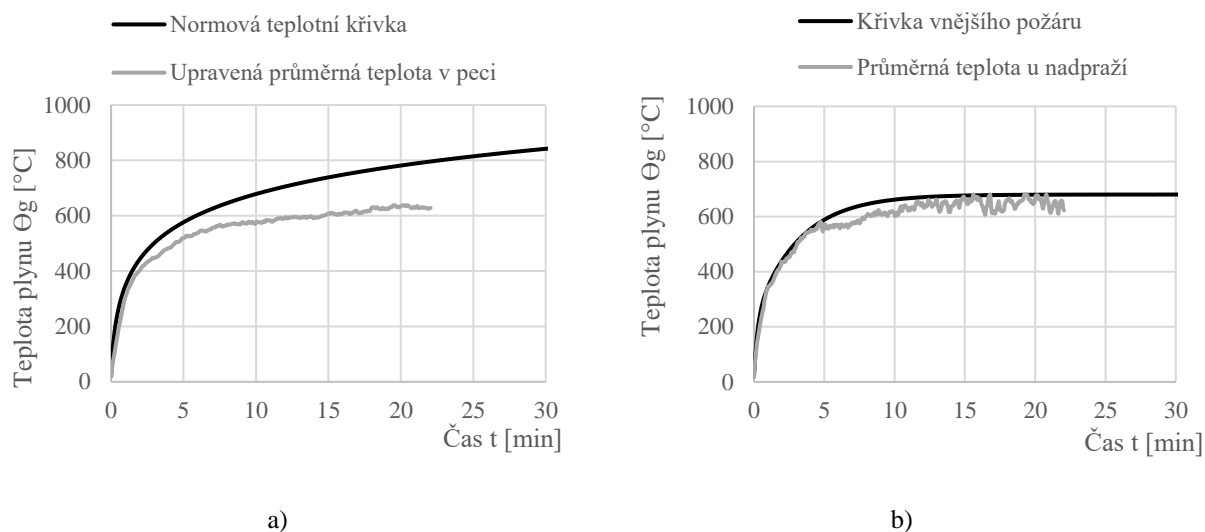
Samotný experiment v požární laboratoři trval 23 minut. K zapnutí měřících zařízení došlo 75 s před spuštěním hořáku. Po vypnutí hořáku ve 20. minutě následovalo vychladnutí pece.



obr. 29 Průběh experimentu referenční pece: a) stavba zkušební pece; b) pohled dovnitř pece s umístěním plynového hořáku; c) zapálení hořáku v 0 s; d) vyšlehnutí plamene z pece

Měření teplot

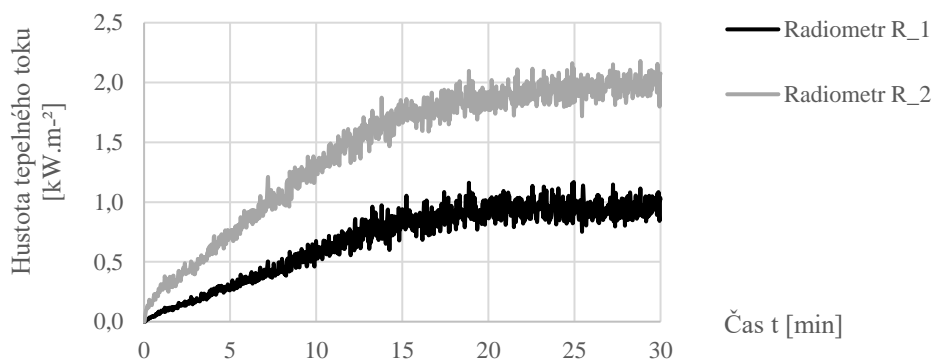
Teplota v peci byla modelována na průběh normové teplotní křivky. Porovnání normové teplotní křivky s průměrnou teplotou v peci zobrazuje graf 5a. Teploty uvnitř pece příliš neodpovídají teplotám dle normové teplotní křivky. V pozdější fázi se jedná o rozdíl přes 100°C a tento rozdíl neustále narůstá. Při instalaci hořáku do polohy pod oknem dochází k dosažení plamene nad nadpraží otvoru. Při experimentu se teploty u nadpraží pohybovaly u teplot křivky vnějšího požáru (graf 5b). Pokud bychom upravili polohu hořáku nebo změnili výkon hořáku, mohlo by dojít k navýšení teplot uvnitř pece. Nežádoucím účinkem by byla změna teplot u nadpraží, což je pro určení požární uzavřenosti nežádoucí.



graf 5 Porovnání teplot u experimentu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží s křivkou vnějšího požáru

Měření tepelného toku

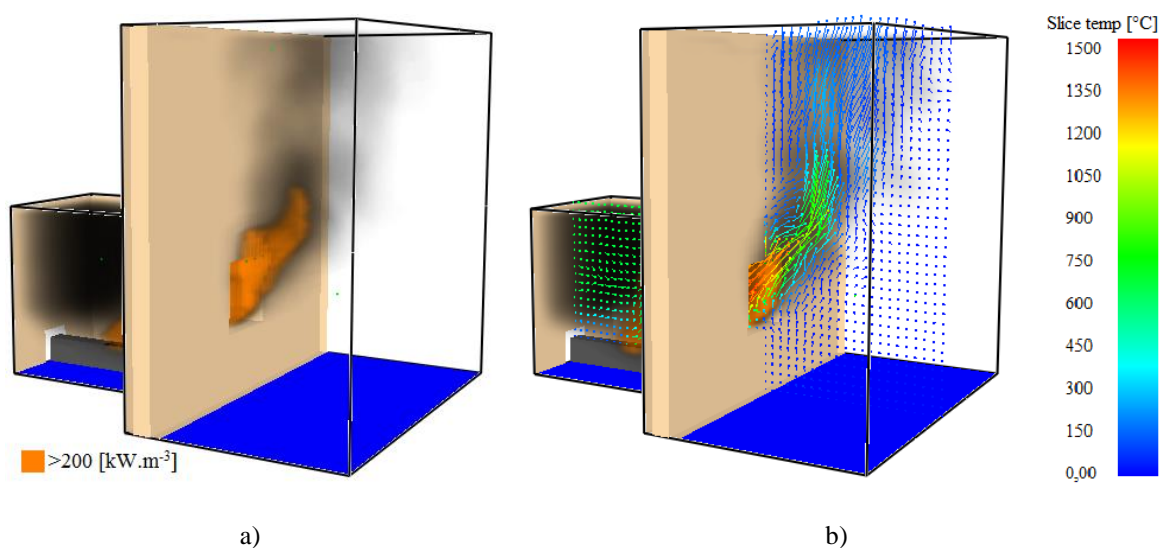
Zdrojem tepla pro naměřené hodnoty tepelného toku je plamen z plynového hořáku. Hodnoty hustoty tepelného toku znázorňuje graf 6. Výsledné hodnoty tepelného výkonu hořáku nejsou uvedeny. Hodnoty se pohybují mimo rozlišovací schopnost kalorimetru.



graf 6 Hustota tepelného toku u experimentu referenční pece

4.1.2 Matematické modelování referenční pece

V rámci experimentu byl vytvořen matematický model referenční pece. Pro matematickou CFD simulaci byla použita verze softwaru FDS 6.5.2 a vizualizační program SMV 6.4.0 Smokeview (obr. 30). Vstupy jsou vepsány do zdrojového kódu (Příloha 1). Výstupem je soubor v tabulkovém editoru a grafický model. V tabulkovém editoru jsou zaznamenány hodnoty z termočlánků a radiometrů. Jednotlivé parametry jsou proměnné v závislosti na čase.



obr. 30 Vizualizace matematického modelu referenční pece v 25. minutě: a) hoření propanu na pískovém hořáku a vývoj kouře; b) vektorové rozložení teplot v rovině $Y = 1,0$

Model je rozdělen na vnitřní a vnější výpočetní oblast o velikosti výpočetní sítě $50 \times 50 \times 50$ mm. Pro vnitřní výpočetní oblast je navrženo celkem 8 960 buněk. Pro vnější výpočetní oblast je navrženo celkem 38 400 buněk. Počáteční okolní teplota definovaná v simulaci je 18°C . Délka simulace je 30 min.

Vnitřní výpočetní oblast je ohraničena konstrukcemi (stěny, podlaha, strop). Pro jednotlivé konstrukce jsou definovány vlastnosti materiálů – objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita. Pro jednotlivé typy konstrukcí jsou stanoveny i tloušťky. Jednotlivé vlastnosti jsou vypsány v tab. 9. Vnější oblast je ohraničena otevřenými plochami. Jednotlivé plochy jsou definovány souřadnicemi x , y , z , kdy pro každou souřadnici jsou dvě hodnoty vyjadřující polohu dané plochy.

tab. 9 Vlastnosti navržených materiálů pro referenční pec

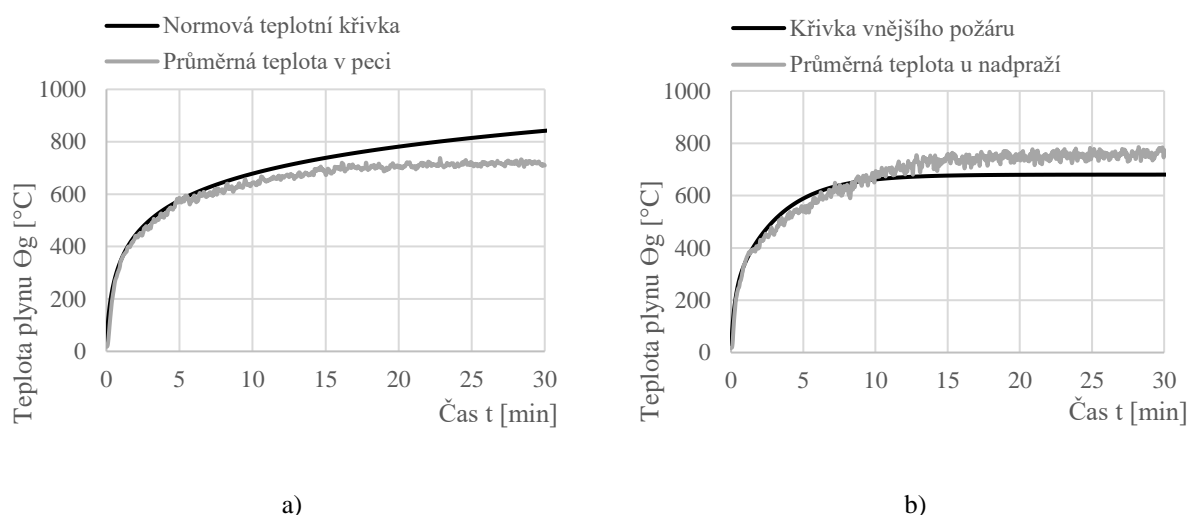
	<i>Stěny</i>	<i>Strop</i>	<i>Podlaha</i>
<i>Označení</i>	<i>„STENA“</i>	<i>„PREKLAD“</i>	<i>„PODLAHA“</i>
<i>Materiál</i>	<i>PORFIX</i>	<i>YTONG</i>	<i>sádrokarton</i>
<i>Objemová hmotnost [kg.m⁻³] - density</i>	<i>700</i>	<i>1000</i>	<i>750</i>
<i>Součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹] - conductivity</i>	<i>0,17</i>	<i>0,176</i>	<i>1,06</i>
<i>Měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹] - specific heat</i>	<i>1,0</i>	<i>1,05</i>	<i>0,22</i>
<i>Tloušťka [m] - thickness</i>	<i>0,150</i>	<i>0,100</i>	<i>0,015</i>

Zápalný zdroj

Horní hořící plocha má rozměr 0,8 x 0,1 m. Výkon hořáku je stanoven na 200 kW. Pro potřeby výpočtu v programu je z výkonu spočtena rychlost uvolňovaného tepla $HRR_{PUA} = 2500 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Průběh rychlosti uvolněného tepla je časově proměnlivý tak, aby výsledné hodnoty teplot uvnitř pece kopírovaly normovou teplotní křivku.

Měření teplot

Pro účel experimentu byl pomocí matematické modelace popsán výkon hořáku, který vytvoří v peci teplotu podobnou normové teplotní křivce. Hodnoty teplot z termočlánků umístěných uvnitř pece jsou porovnány s normovou teplotní křivkou (graf 7a). Hodnoty teplot z termočlánků umístěných u nadpraží otvoru v čelní stěně jsou porovnány s křivkou vnějšího požáru (graf 7b).

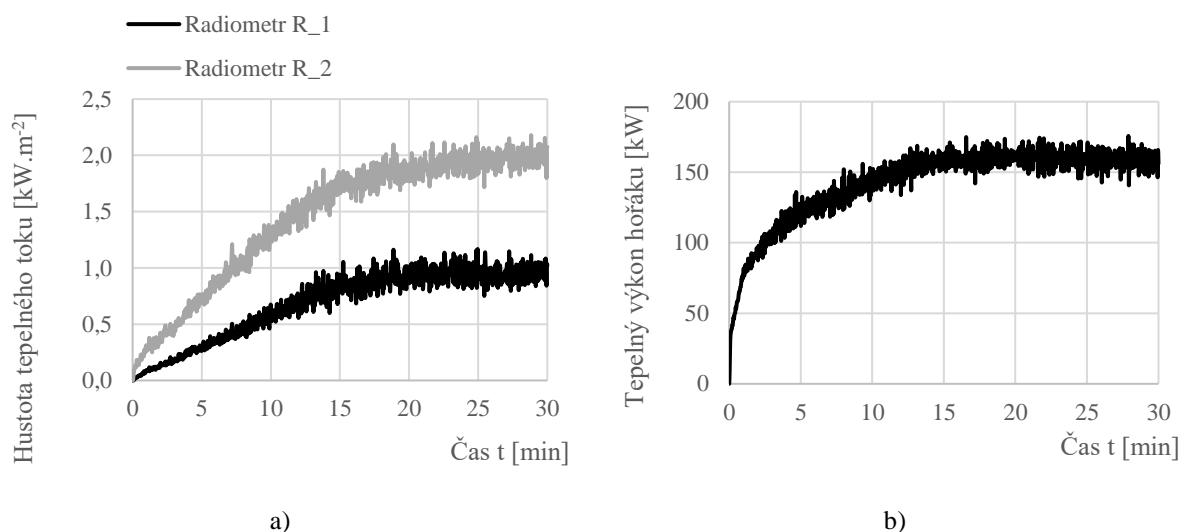


graf 7 Porovnání teplot u matematického modelu referenční pece: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží s křivkou vnějšího požáru

Teploty uvnitř pece jsou nižší než hodnoty na normové teplotní křivce. Pro hodnocení požární uzavřenosti je důležitější graf pro porovnání teplot u nadpraží. V tomto případě jsou teploty vyšší. Pro snížení teplot u nadpraží by muselo dojít k úpravě některých vstupních údajů. Hořící plocha se může umístit dál od otvoru. Ale pokud by byla vzdálenost příliš velká, nemusely by se plameny dostat mimo pec. Druhou možností je upravení výkonu hořáku po 10. minutě hoření.

Simulace tepelného toku

Zdrojem tepla pro naměřené hodnoty tepelného toku je teplo z plynového hořáku. Hodnoty hustoty tepelného toku a tepelný výkon hořáku znázorňuje graf 8. Hustota tepelného toku 0,5 m před otvorem je dvojnásobná než hodnoty 1,35 m nad otvorem. Hustota tepelného toku nejrychleji narůstá do 15. minuty. V 15. minutě je ustálen výkon hořáku a průběh hustoty tepelného toku dále mírně stoupá.



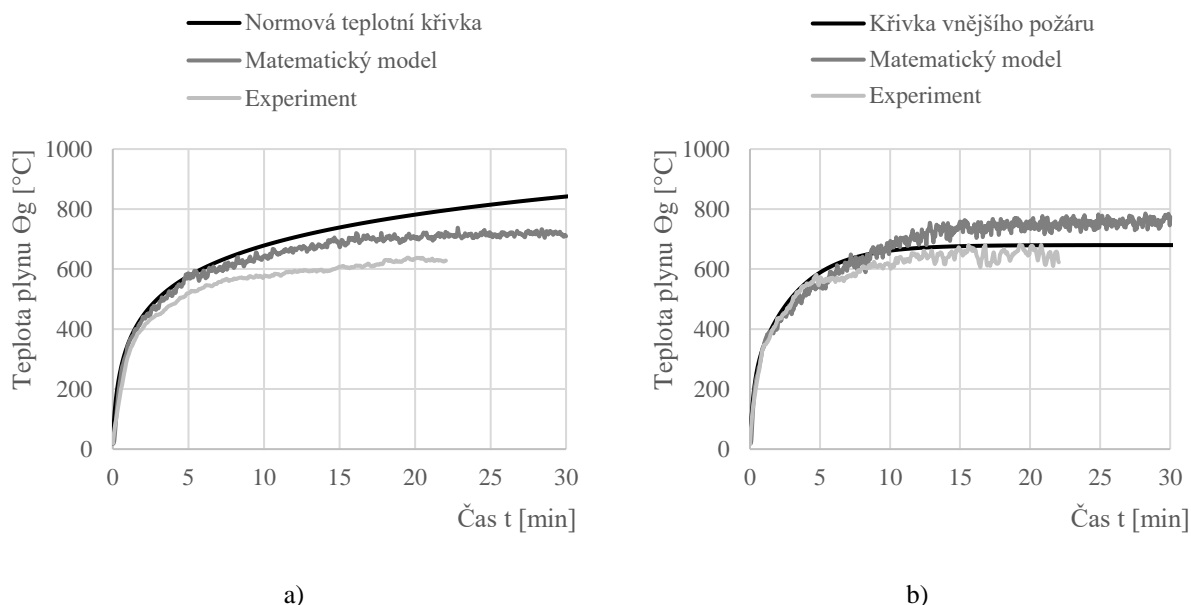
graf 8 Matematický model referenční pece: a) hustota tepelného toku; b) tepelný výkon hořáku

4.1.3 Porovnání výsledků experimentu a matematického modelu referenční pece

Při porovnání experimentu s matematickým modelem jsou zjištěny výchyly měřených hodnot u teplot a uvolněného tepla.

Porovnání měřených a simulovaných teplot

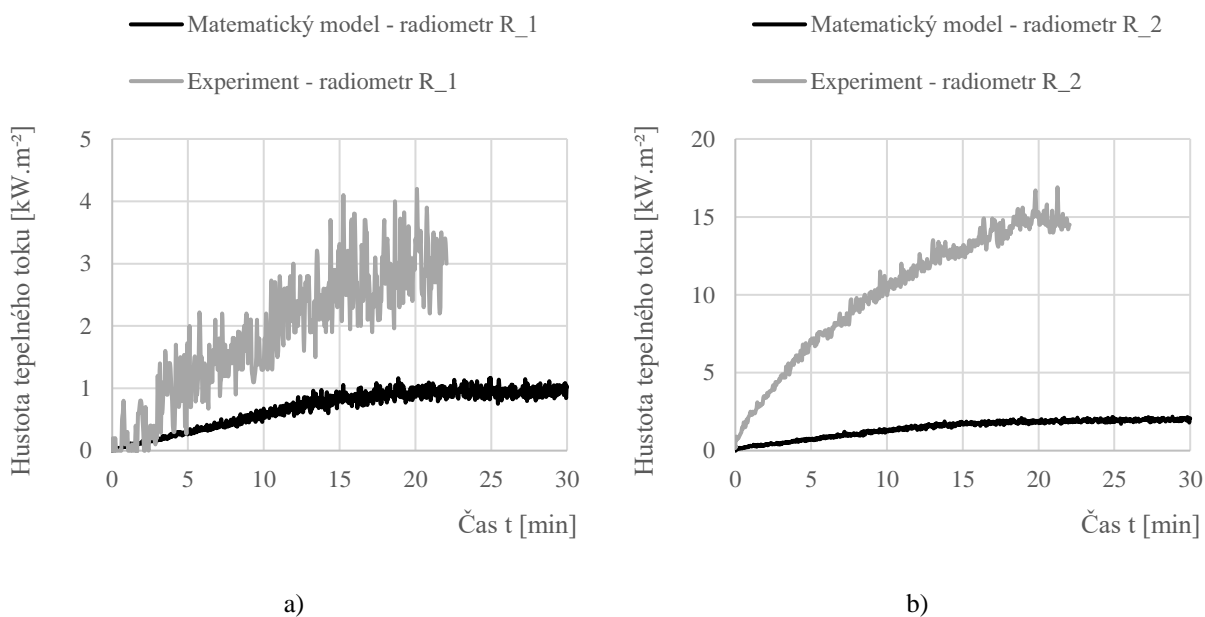
Rozdíl naměřených teplot při experimentu, vypočtených teplot z matematického modelu a teplotních křivek znázorňuje graf 9. U teploty uvnitř pece se odchylka u matematického modelu pohybuje okolo 10 %, zatímco u experimentu je rozdíl v 15. minutě více než 17 % a dále se zvyšuje. Z hlediska problematiky požární uzavřenosti je důležitější porovnání teplot u nadpraží s křivkou vnějšího požáru. Rozdíl teplot z experimentu a matematického modelu u nadpraží s křivkou vnějšího požáru je v odchylce ± 5 až 10 %. Tuto odchylku lze akceptovat.



graf 9 Porovnání teplot z experimentu a matematického modelu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží otvoru s křivkou vnějšího požáru

Porovnání měřených a simulovaných hodnot tepelného toku

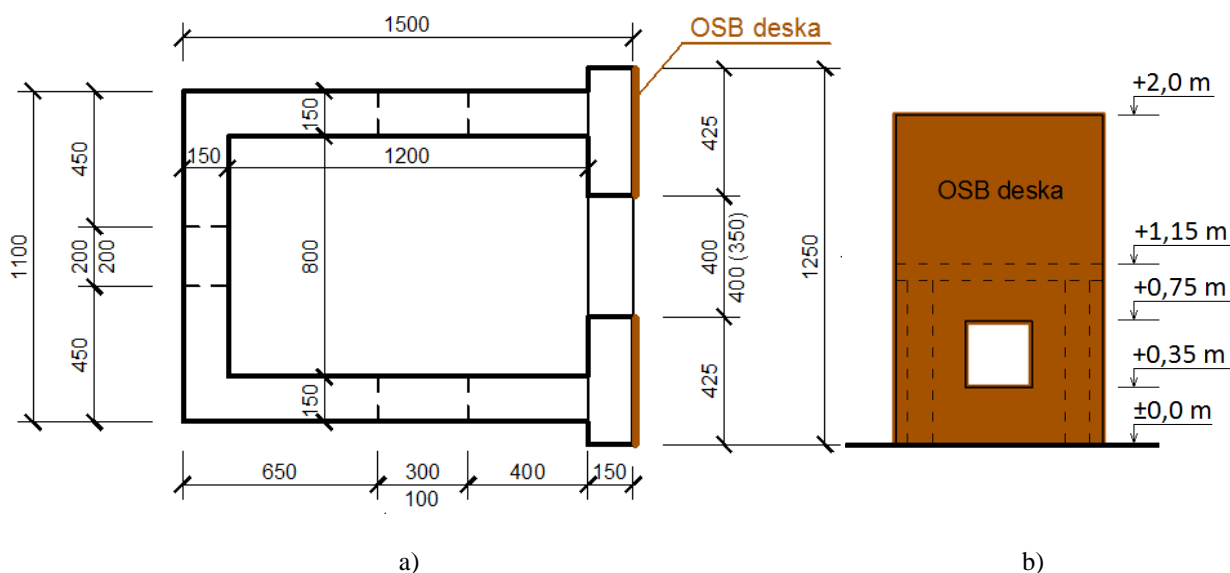
Zatímco rozdíl teplot u matematického modelu a experimentu se pohybuje okolo 10 %, rozdíl hodnot tepelných toků je mnohonásobně vyšší (graf 10). Výsledné hodnoty tepelného výkonu hořáku nejsou porovnány, jelikož v případě experimentu se pohybují mimo rozlišovací schopnost kalorimetru.



graf 10 Porovnání experimentu s matematickým modelem z hlediska hustoty tepelného toku pro: a) radiometr R_1; b) radiometr R_2

4.2 Zkouška obvodové stěny s hořlavým obkladem

Zkušební pec s hořlavým obkladem se od referenční pece příliš neliší. Vnitřní rozměry pece, použitý stavební materiál, umístění plynového hořáku a měřících zařízení je totožné. Změnou je pouze přidání hořlavého obkladu na přední stěnu. Na obklad je použita OSB deska o velikosti 1,25 x 2,0 m a tloušťce 15 mm (obr. 31). Deska je přichycena šrouby k pórobetonovým tvárnici. Umístění hořáku a měřících zařízení je totožné s referenční pecí.



obr. 31 Umístění hořlavého obkladu – OSB desky: a) půdorys pece; b) pohled na čelní stěnu

4.2.1 Průběh zkoušky obvodové stěny s hořlavým obkladem

Experiment s hořlavým obkladem byl uskutečněn po vychladnutí pece po zkoušce referenční pece. Referenční pec zůstala beze změny, pouze byla přidána OSB deska s vyznačeným rastrem 25 x 25 cm pro odhad postupu šíření plamene. Podmínky při zkoušce byly stejné. Průběh experimentu je popsán v tab. 10.

tab. 10 Průběh experimentu pece s hořlavým obkladem

Čas (s)	Čas (min)	Specifikace
-	-	Zapnutí měřících zařízení, zhotovení prvotní fotodokumentace
0	0	Spuštění hořáku – 30 kW (obr. 32a)
30	0,5	První vyšlehnutí plamenů otvorem pece
150	2,5	Zapálení OSB desky u pravého ostění (obr. 32b)
270	4,5	Přiblížení radiometru R 2 blíže k otvoru
450	7,5	Zahoření nadpraží otvoru (obr. 32c)
1020	17	Uvolnění termočlánků u nadpraží – TC_5 a TC_6
1800	30	Vypnutí hořáku
2400	40	Ukončení záznamu dat

Samotný experiment v požární laboratoři trval 40 minut. K zapnutí měřících zařízení došlo 75 s před spuštěním hořáku. V 2,5. minutě bylo zaznamenáno první zahoření OSB desky. Během experimentu došlo k odhoření OSB desky po výšce vzorku (obr. 32). Do stran se plamen téměř nešířil (obr. 32h). Po vypnutí hořáku ve 30 minutě následovalo vychladnutí pece. Během chladnutí odpadávaly zuhelnatělé části OSB desky.

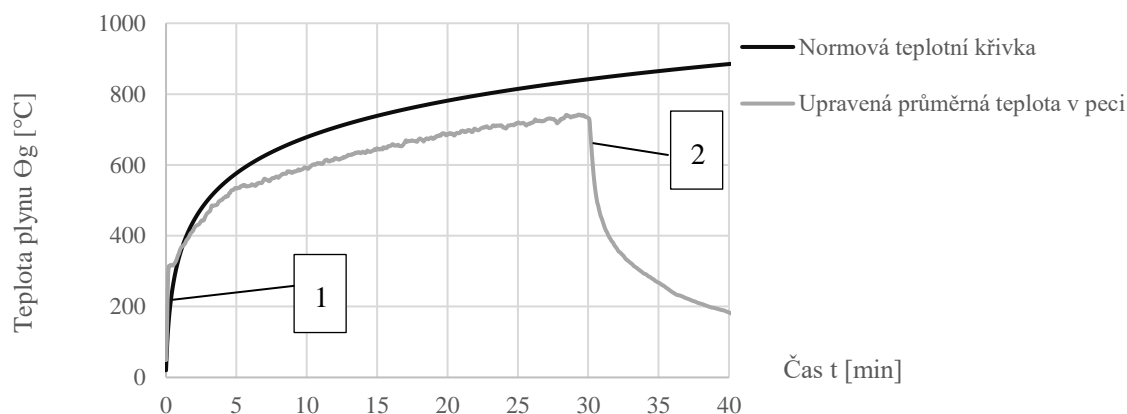
Umístění jednotlivých měřících zařízení proběhlo před začátkem referenční zkoušky. Při úpravě pece přidáním hořlavého obkladu byl radiometr R_2 (s polohou 0,6 m nad podlahou a ve vzdálenosti 0,5 m od otvoru) přemístěn, aby nedošlo k jeho poškození. Před začátkem následující zkoušky nedošlo k jeho navrácení na původní polohu. V případě rozlišného umístění radiometru by nebyly výsledné hodnoty porovnatelné, proto v 4,5. minutě došlo k navrácení radiometru do původní navržené polohy.



obr. 32 Průběh experimentu pece s hořlavým obkladem: a) zapálení hořáku v 0 s; b) zapálení OSB desky u pravého ostění v 2,5. min (150 s); c) šíření plamene v 7,5. min (450 s) – plamen 15 cm nad otvorem; d) šíření plamene v 15. min (900 s) – plamen 50 cm nad otvorem; e) šíření plamene v 25. min (1500 s) – plamen 85 cm nad otvorem; f) vypnutí hořáku v 3.0 min (180 s); g) odpadávání zuhelnatělé OSB desky – vytvoření torzního stínu; h) odhoření a odpadnutí hořlavého obkladu do výšky 25 cm nad nadpražím, rozšíření plamenů do výšky 90 cm nad nadpraží

Měření teplot

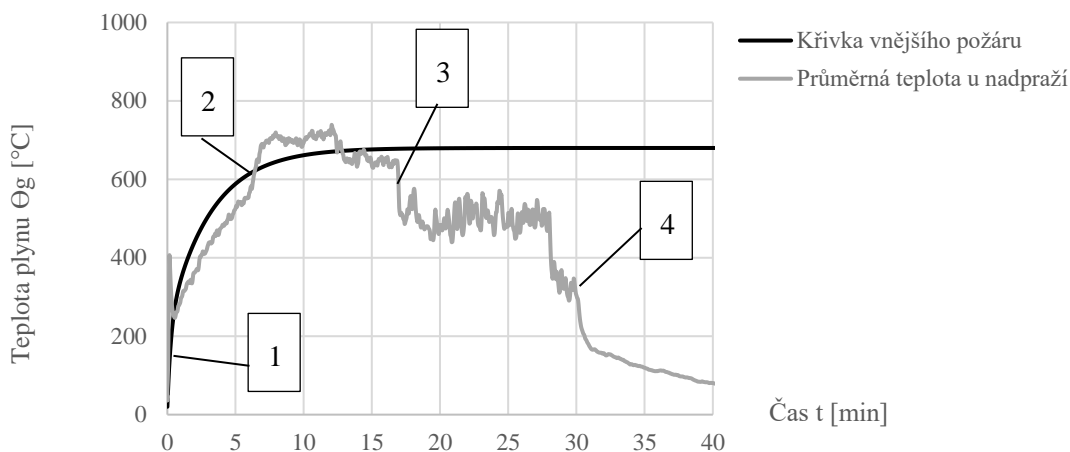
Teplota v peci byla modelována na průběh normové teplotní křivky. Porovnání normové teplotní křivky s průměrnou teplotou v peci znázorňuje graf 11. Na začátku měření je skok teploty k 300°C, což je způsobeno spálením nahromaděného plynu v peci.



Legenda: 1 - spálení nahromaděného plynu; 2 – vypnutí hořáku

graf 11 Pec s hořlavým obkladem - porovnání teplot uvnitř pece matematického modelu s normovou teplotní křivkou

Rozšíření plamenů na fasádu by mělo odpovídat průběhu teplot křivce vnějšího požáru. Porovnání křivky vnějšího požáru s průměrnou teplotou u nadpraží otvoru znázorňuje graf 12. Na začátku měření dochází k náhlému nárůstu teploty k hodnotě 400°C, což je způsobeno vzplanutím nespáleného plynu nahromaděného v peci. Nárůst teploty do 7. minuty kopíruje křivku vnějšího požáru s odchylkou přibližně 15 %. Okolo 7,5. minuty je patrný nárůst teploty z důvodu vzplanutí hořlavého obkladu. Dále je teplota kolísavá. K významnému poklesu teploty dochází okolo 17. minuty. V tomto čase se uvolnily termočlánky TC_5 a TC_6. Teploty v další fázi kopírují průběh křivky vnějšího požáru s odchylkou cca 25 %.

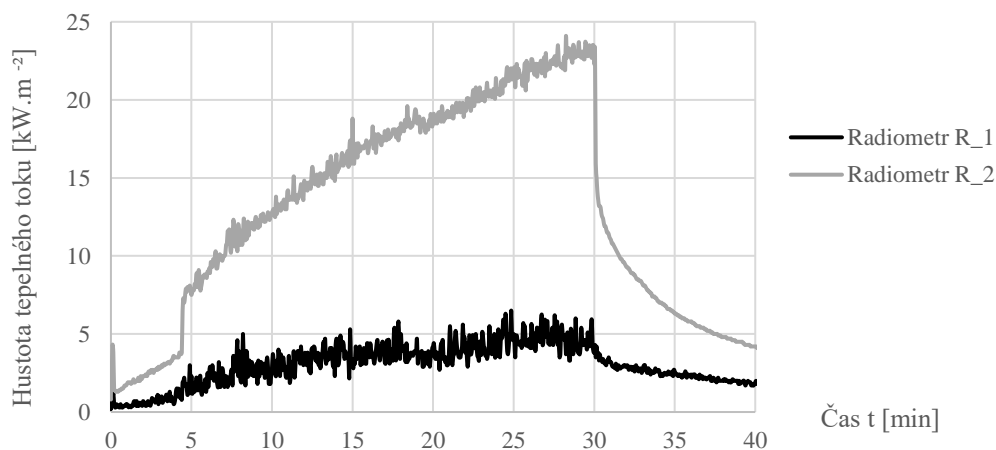


Legenda: 1 - spálení nahromaděného plynu; 2 – zahoření nadpraží otvoru; 3 – uvolnění termočlánků TC_5 a TC_6 v nadpraží; 4 – vypnutí hořáku

graf 12 Pec s hořlavým obkladem - porovnání teplot u nadpraží experimentu s křivkou vnějšího požáru

Měření tepelného toku

Zdrojem tepla pro naměřené hodnoty tepelného toku je plamen z plynového hořáku a z odhořívání OSB desky na čelní stěně. Hodnoty hustoty tepelného toku znázorňuje graf 13. Na začátku měření dochází k náhlému nárůstu hustoty tepelného toku $4,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, což je způsobeno spálením nahromaděného plynu v peci. V čase 4,5 minuty dochází k růstu hustoty tepelného toku z důvodu přiblížení radiometru R_2 do polohy 0,5 m před otvor. Výsledné hodnoty tepelného výkonu hořáku nejsou uvedeny, jelikož se pohybují mimo rozlišovací schopnost kalorimetru.

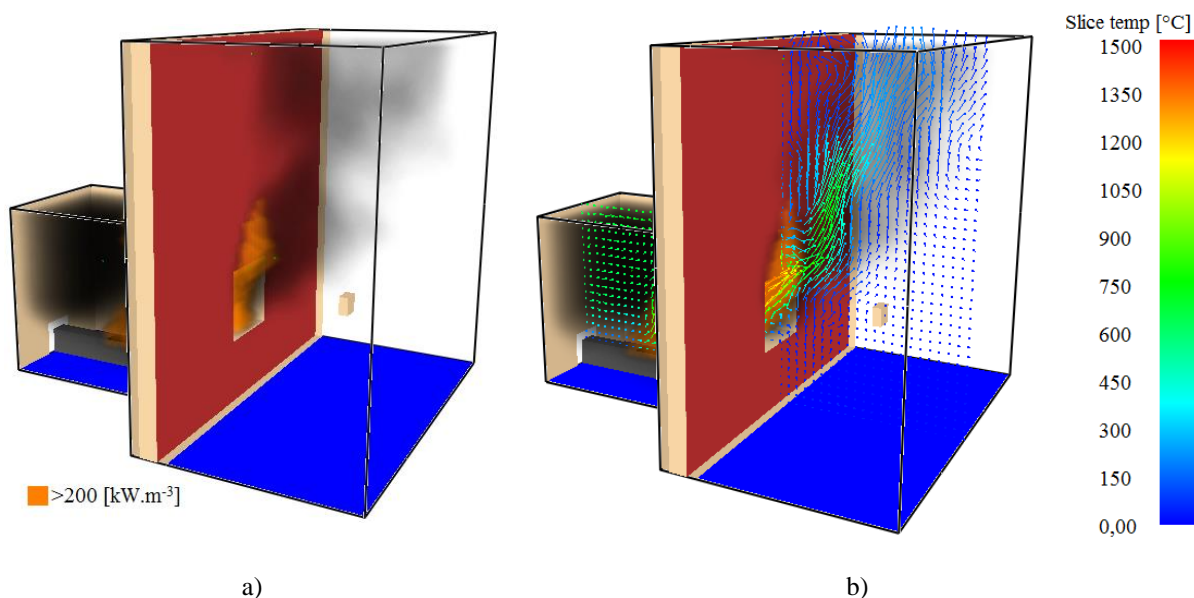


graf 13 Pec s hořlavým obkladem - hustota tepelného toku u experimentu

4.2.2 Matematický model pece s hořlavým obkladem

V rámci experimentu byl vytvořen matematický model pece s hořlavým obkladem. Pro obklad byla použita OSB deska. Pro matematickou CFD simulaci byla použita testovací verze softwaru

FDS 6.5.2 a vizualizační program SMV 6.4.0 Smokeview (obr. 33). Vstupy jsou vepsány do zdrojového kódu (Příloha 2). Výstupem je soubor v tabulkovém editoru a grafický model. V tabulkovém editoru jsou zaznamenány hodnoty z termočlánků a radiometrů. Jednotlivé parametry jsou proměnné v závislosti na čase.



obr. 33 Vizualizace matematického modelu pece s hořlavým obkladem v 20. minutě: a) hoření propanu na pískovém hořáku a vývoj kouře; b) vektorové proudění teplot v rovině $Y = 1,0$

Model pece je totožný s referenční pecí. Je rozdělen na vnitřní a vnější výpočetní oblast o velikosti výpočetní sítě $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$. Počáteční okolní teplota definovaná v simulaci je 18°C . Délka simulace je 30 min.

Navržené konstrukce mají totožné vlastnosti jako u referenční pece (tab. 11). Ve zdrojovém kódu je pouze přidán obklad z OSB desky na čelní stěnu pece. Obklad je definován rozměry, technickými vlastnostmi (objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita a tloušťka). Jelikož se jedná o hořlavý materiál s nižší zápalnou teplotou, než je maximální dosažená teploty u křivky vnějšího požáru, jsou definovány požárně technické vlastnosti. Potřebná data jsou získána z diplomové práce Ing. Jakuba Procházky, kde byla stanovena pomocí zkoušky OSB desky v kónickém kalorimetru. Pro účely této práce byly využity hodnoty rychlosti uvolňování tepla $\text{HRRPUA} = 195,0 \text{ kW.m}^{-2}$, zápalné teploty $\text{IGNITION TEMPERATURE} = 270^\circ\text{C}$ a spalného tepla $\text{HEAT OF COMBUSTION} = 18\,000 \text{ kg}$ [34].

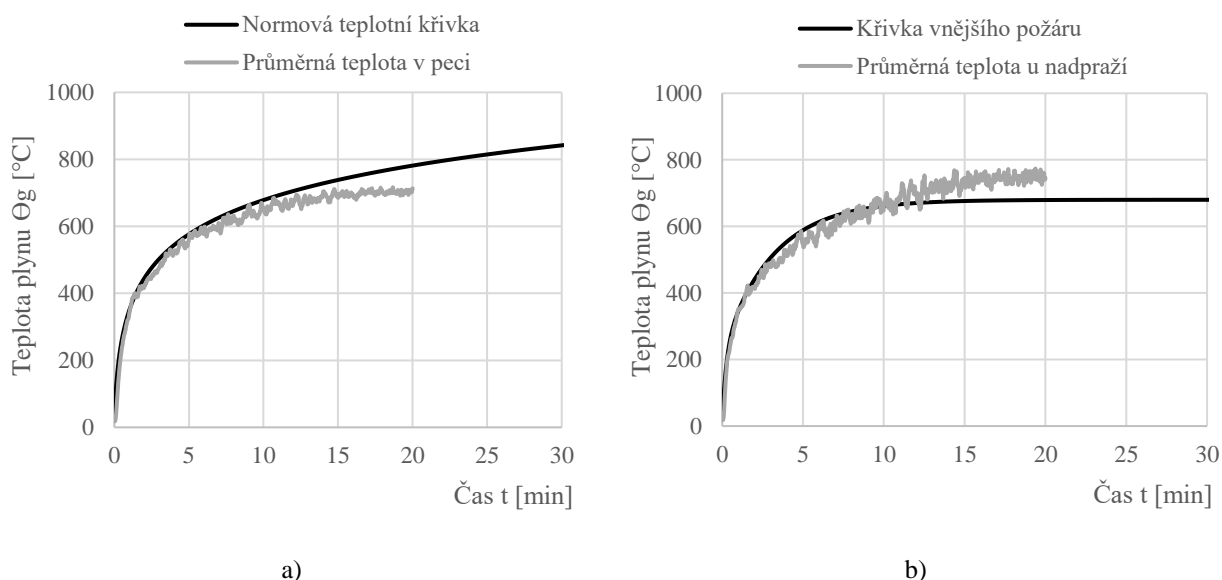
tab. 11 Vlastnosti navržených materiálů pro zkušební pec s hořlavým obkladem

	Stěny	Strop	Podlaha	OSB deska
Označení	„STENA“	„PREKLAD“	„PODLAHA“	„OSB_DESKA“
Materiál	PORFIX	YTONG	SDK	OSB deska
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - density	700	1000	750	600
Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] - conductivity	0,17	0,176	1,06	0,2
Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] - specific heat	1,0	1,05	0,22	1,3
Tloušťka [m] - thickness	0,150	0,100	0,015	0,015

Simulace teplot

Snahou matematické modelace je vytvoření teploty v peci s průběhem odpovídajícím normové teplotní křivce. Hodnoty teplot z termočlánků umístěných uvnitř pece jsou porovnány s normovou teplotní křivkou (graf 14a). Teploty uvnitř pece jsou nižší než teploty normové teplotní křivky. Rozdíl v 15. minutě je cca 50°C a stále se zvyšuje až na hodnotu rozdílu cca 100°C ve 20. minutě.

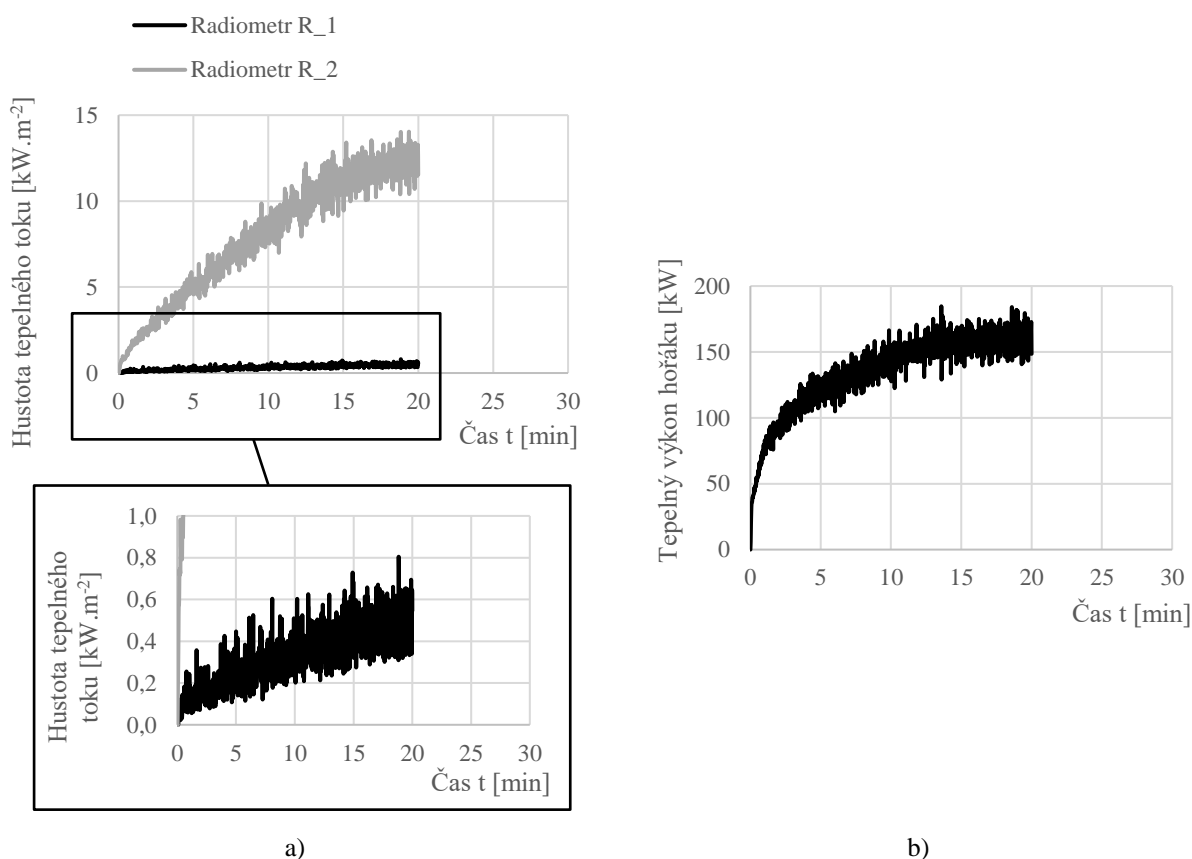
Hodnoty teplot z termočlánků umístěných u nadpraží otvoru v čelní stěně jsou porovnány s křivkou vnějšího požáru (graf 14b). Teploty uvnitř pece kopírují tuto křivku s odchylkou okolo 10 %. Do 15. minuty dochází k nárůstu teploty a poté k ustálení hodnot okolo teploty 750°C .



graf 14 Matematický model pece s hořlavým obkladem: a) porovnání teplot uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) porovnání teplot u nadpraží s křivkou vnějšího požáru

Simulace tepelného toku

Zdrojem tepla pro naměřené hodnoty tepelného toku je teplo z plynového hořáku a odhořívajícího obkladu OSB deskou. Hodnoty hustoty tepelného toku a tepelného výkonu hořáku znázorňuje graf 15. Hustota tepelného toku nejrychleji narůstá do 15. minuty. V 15. minutě je ustálen výkon hořáku a průběh hustoty tepelného toku dále mírně stoupá. Množství hustoty tepelného toku dopadající na radiometr R_2 před otvorem je mnohonásobně vyšší, než je tomu u radiometru R_1.



graf 15 Matematický model pece s hořlavým obkladem: a) hustota tepelného toku; b) tepelný výkon hořáku

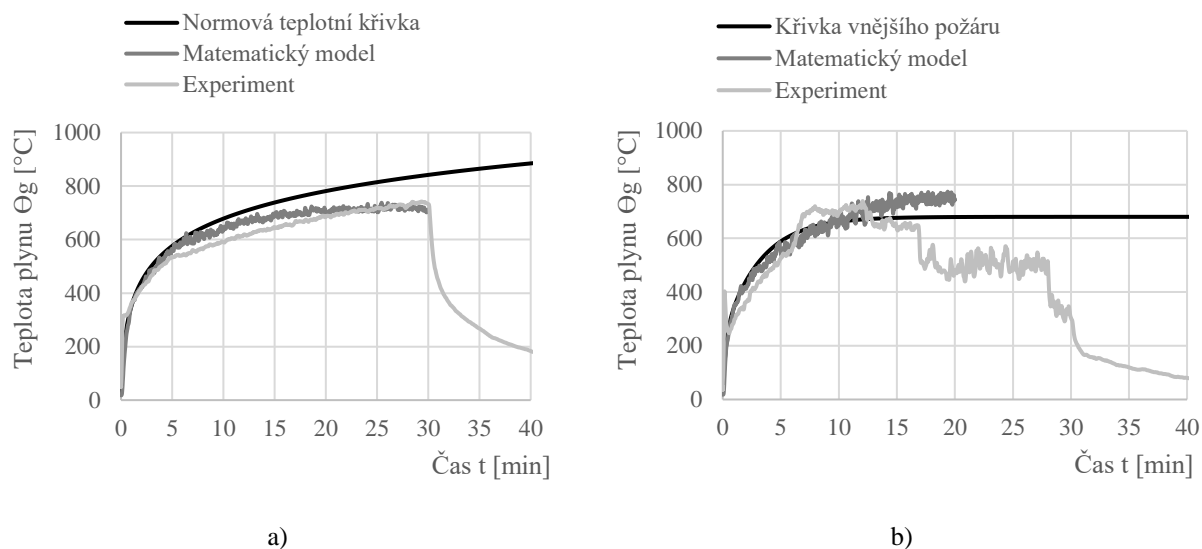
4.2.3 Porovnání výsledků experimentu a matematického modelu zkušební pece s hořlavým obkladem

Při porovnání experimentu s matematickým modelem jsou zjištěny výchyly měřených hodnot u teplot a uvolněného tepla.

Porovnání měřených a simulovaných teplot

Rozdíl naměřených teplot při experimentu, vypočtených teplot z matematického modelu a teplotních křivek znázorňuje graf 16. Rozdíl teplot matematického modelu u nadpraží s křivkou vnějšího požáru je v odchylce do 10 %. V případě experimentu je teplota u nadpraží velmi proměnná v závislosti na nepředvídatelném průběhu zkoušky. Na začátku zkoušky došlo

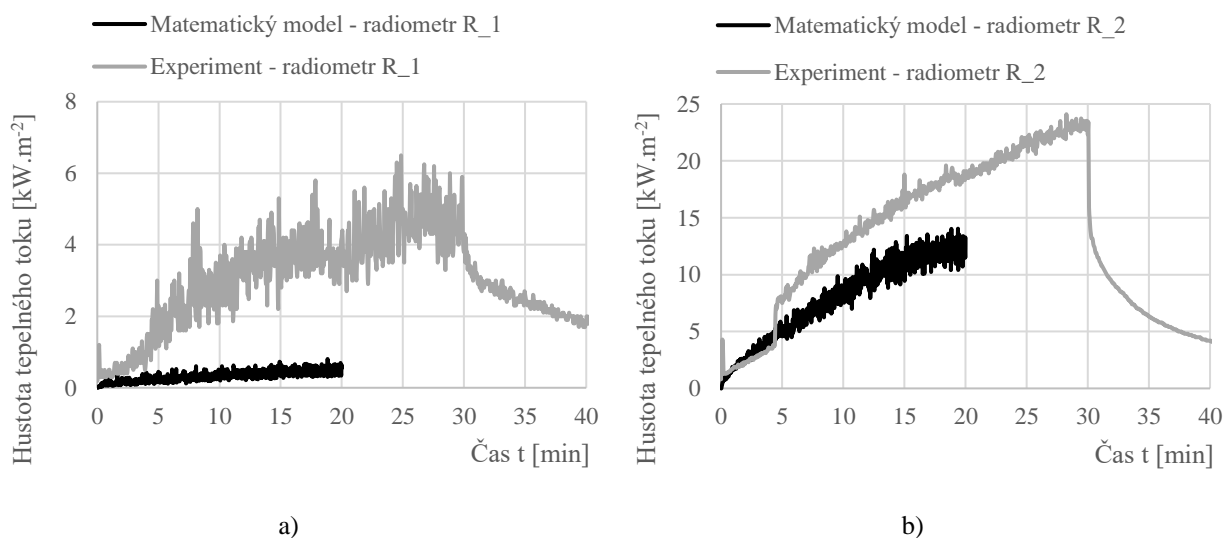
ke spálení nahromaděného plynu. Dalšími faktory je zahoření OSB desky v 7,5. minutě a odpadnutí termočlánků v 17. minutě zkoušky. U teploty uvnitř pece se odchylka u matematického modelu a experimentu pohybuje podobně do 10 %.



graf 16 Porovnání teplot z experimentu a matematického modelu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží otvoru s křivkou vnějšího požáru

Porovnání měřených a simulovaných hodnot tepelného toku

Zatímco rozdíl teplot u matematického modelu a experimentu se pohybuje okolo 10 %, rozdíl hodnot tepelných toků je mnohonásobně vyšší (graf 17). Výsledné hodnoty tepelného výkonu hořáku nejsou porovnány, jelikož v případě experimentu se pohybují mimo rozlišovací schopnost kalorimetru.



graf 17 Porovnání experimentu s matematickým modelem z hlediska hustoty tepelného toku pro: a) radiometr R_1; b) radiometr R_2

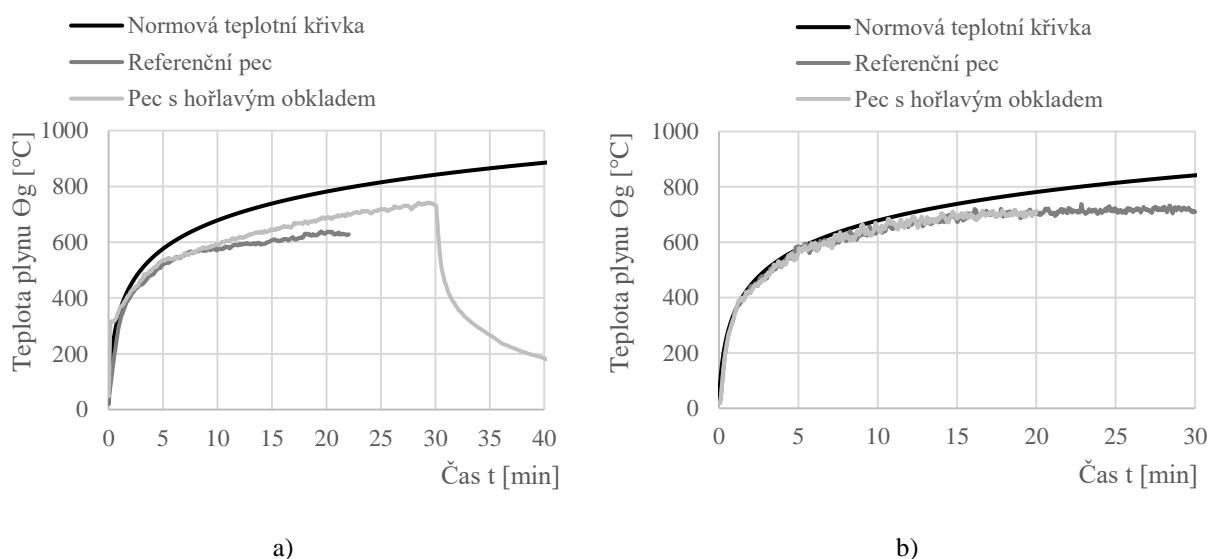
4.3 Porovnání výsledků referenční zkoušky a zkušební pece s hořlavým obkladem

Na závěr experimentu jsou porovnány výsledky z požárních zkoušek a matematických modelů mezi referenční pecí a pecí s hořlavým obkladem. Pro porovnání jsou použity hodnoty teplot uvnitř pece i u nadpraží, dále hustota tepelného toku pro oba radiometry a rychlost uvolňování tepla.

Porovnání teplot

Rozdíl naměřených teplot uvnitř pece znázorňuje graf 18. Teploty při požárních zkouškách jsou podobné. Výkyv na začátku experimentu u pece s hořlavým obkladem je způsoben vzplanutím nespáleného plynu nahromaděného v peci. I přes zadání obdobných okrajových podmínek, nelze vytvořit totožný požár při dvou zkouškách.

V případě matematických modelů není teplotní rozdíl uvnitř pece příliš rozdílný. K výkyvu dochází po 5. minutě, kdy se teplota uvnitř pece snižuje a dochází k odchýlení od normové teplotní křivky. Pokud by se ve zdrojovém kódu provedla úprava zvýšení výkonu hořáku po 5. minutě směrem nahoru a průběh teplot při požáru by byl popsán dále než do 900 s (tj. 15 minut), mohl by být průběh teplot uvnitř pece srovnatelný s normovou teplotní křivkou.

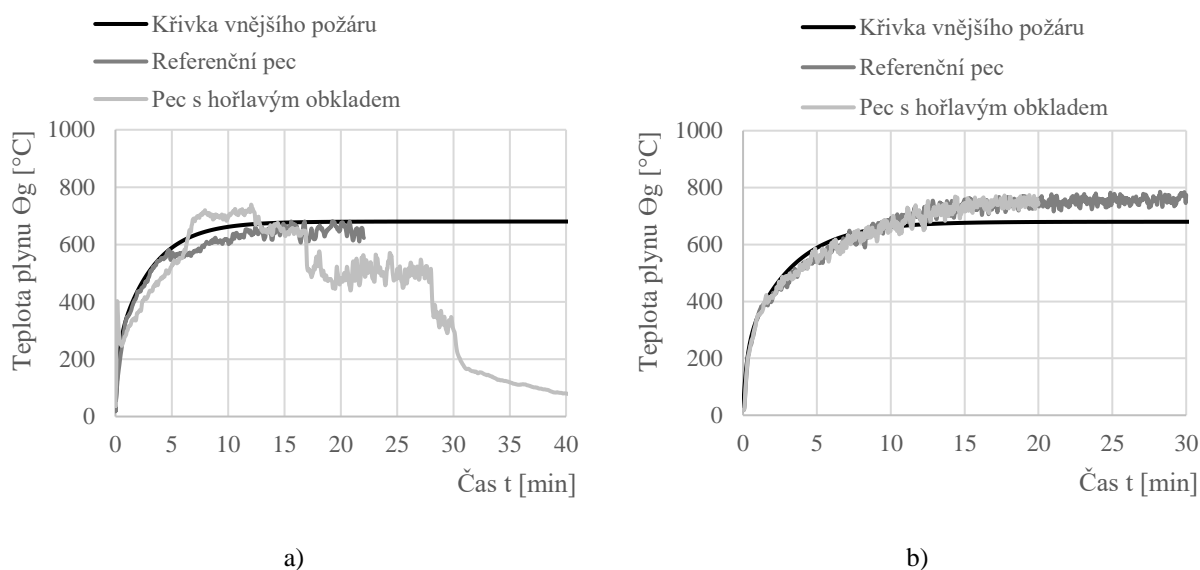


graf 18 Porovnání teplot uvnitř pece pro: a) požární zkoušky; b) matematické modely

Teploty u nadpraží v porovnání s křivkou vnějšího požáru nejsou už tak podobné jako je tomu uvnitř pece (graf 19). V případě referenční pece je průběh teplot srovnatelný s křivkou vnějšího požáru s odchylkou okolo 5 %. U pece s hořlavým obkladem byla očekávána teplota u nadpraží vyšší z důvodu hoření obkladu, ale v závislosti na nepředvídatelném průběhu zkoušky je teplota značně proměnná. K prudšímu nárůstu teploty dochází v 7,5 minutě po zahoření OSB desky. Ke zvyšování teploty dochází do cca 12. minuty. V 12. a v 17. minutě dochází k poklesu

teploty z důvodu uvolnění fixace termočlánků v nadpraží. Termočlánky se posunuly pod nadpraží otvoru, kde byly nižší teploty.

U matematických modelů je průběh teplot v nadpraží totožný, i přes zahoření OSB desky. Důvodem by mohlo být umístění termočlánků 0,001 m pod hranu nadpraží. Rozdíl oproti křivce vnějšího požáru jsou teploty od 8. minuty vyšší. Aby byly teploty srovnatelné s křivkou vnějšího požáru, musel by se snížit výkon hořáku. Druhou možností je navrhnout jiné zastínění hořáku tak, aby hořící plocha zůstala totožná. Např. zastínění hořáku pod oknem v délce 100 mm a zastínění v zadní části pece pouze 300 mm.

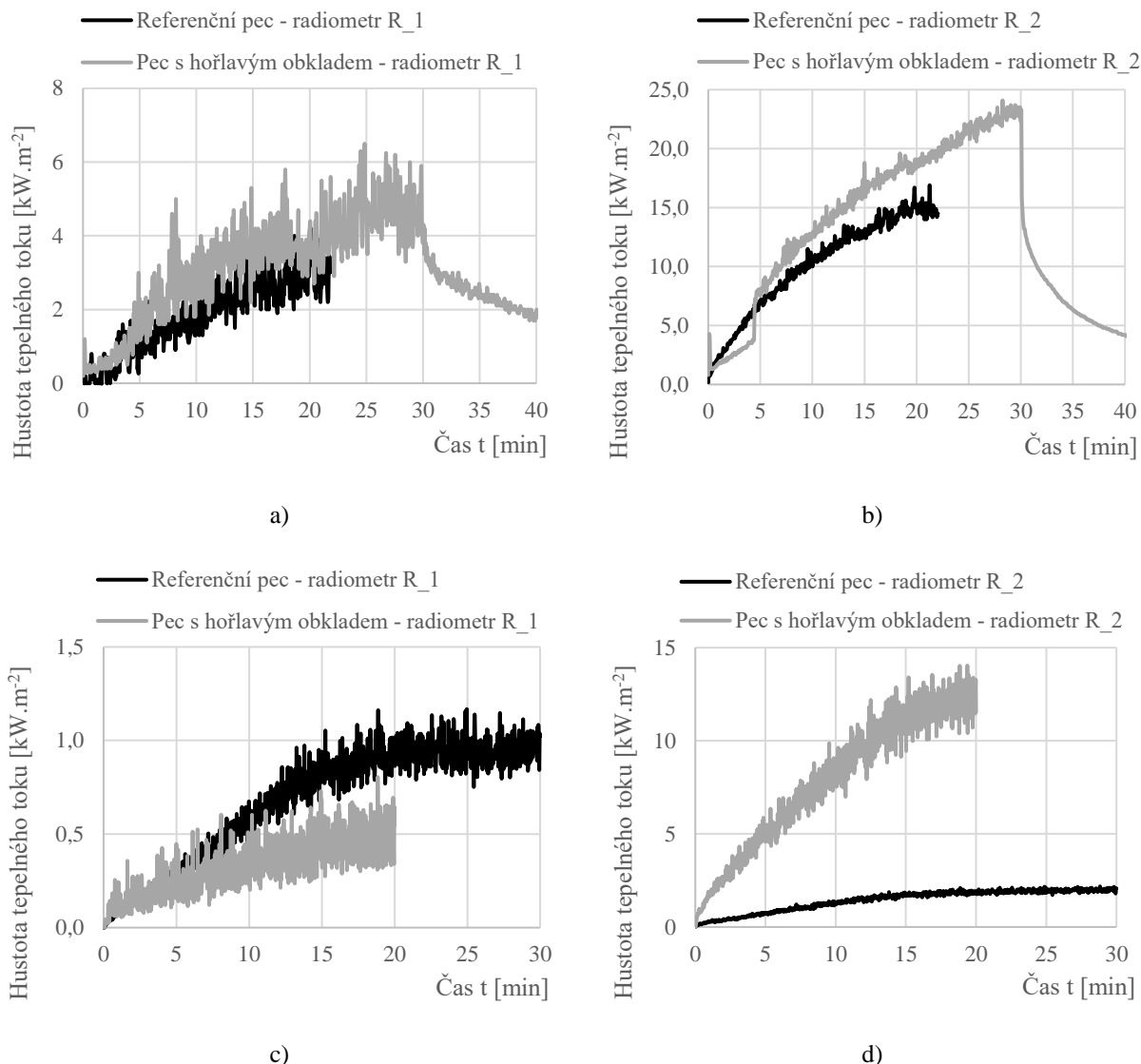


graf 19 Porovnání teplot u nadpraží otvoru v čelní stěně pece: a) při požárních zkouškách; b) u matematických modelů

Porovnání tepelných toků

Porovnání průběhů hustoty tepelného toku znázorňuje graf 20. Rozdílný průběh je dán přidáním hořlavého obkladu na čelní stěnu pece. U referenční pece je hustota tepelného toku měřena pouze pro plamen z hořáku, zatímco u pece s hořlavým obkladem se jedná o hodnoty získané kombinací tepla z hořáku a hořením OSB desky. V případě radiometru R_1 se jedná o rozdíl v rámci 1 až 2 kW.m⁻² (graf 20a). U radiometru R_2 je rozdíl o něco vyšší, rozdíl hodnot je 2 až 5 kW.m⁻² (graf 20b).

Matematické modely mají rozdíl hustot tepelného toku u jednotlivých zkoušek menší než je tomu u experimentů, rozdíl se pohybuje od 0,1 až 0,2 kW.m⁻² u radiometru R_1 i R_2 (graf 20c a graf 20d). Při porovnání výsledků matematických modelů je viditelná nesrovnalost u hustoty tepelného toku pro radiometru R_1 (graf 20c). Vyšší hodnoty hustoty tepelného toku u referenční pece mohou být způsobeny chybou při zadávání modelu ve zdrojovém kódu.



graf 20 Porovnání hustoty tepelného toku: a) radiometr R_1 při požární zkoušce; b) radiometr R_2 při požární zkoušce; c) radiometr R_1 u matematického modelu; d) radiometr R_2 u matematického modelu

4.4 Závěr alternativní zkoušky pro určení požární uzavřenosti

V rámci experimentu byla navržena a postavena zkušební pec z pórobetonových tvárnic a překladů. Byly provedeny dvě zkoušky pro porovnání chování konstrukce bez úpravy a konstrukce s hořlavou vnější povrchovou úpravou. Pro oba typy zkoušek byl vytvořen matematický CFD model.

Pokud bychom požární uzavřenost výše řešeného příkladu určili výpočetní metodou množství uvolněného tepla, byla by stěna klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha. Při výpočtu z rovnice 1 (kapitola 2.2.1), kdy tloušťka OSB desky je 15 mm, výhřevnost materiálu je 17 MJ/kg a objemová hmotnost je 680 kg/m^3 , je výsledná hodnota spočtena následovně:

$$Q = \sum_{i=1}^j M_i \cdot H_i = \sum_{i=1}^j d_i \cdot \rho_i \cdot H_i = 0,015 \cdot 680 \cdot 17 = 173 \text{ MJ/m}^2$$

$$150 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \leq Q = 173 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \leq 350 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

Stěna je klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha.

Stanovení požární uzavřenosti na základě výsledků z navržené zkoušky není příliš vhodné, jelikož klasifikace požární uzavřenosti se stanovuje pomocí hustoty tepelného toku na hořícím povrchu. Pro měření tohoto parametru není v současnosti zařízení. Zároveň není stanovena ani metodika zkoušení tohoto parametru.

Zkouška by mohla sloužit výrobcům, kteří navrhují nové skladby jako příležitost danou skladbu vyzkoušet a na základě výsledků zkoušky skladbu upravit. Upravené skladby lze dále zkoušet v akreditovaných zkušebnách pomocí středněrozměrových nebo velkorozměrových zkoušek. Samotné zkoušení požární uzavřenosti pomocí normových zkoušek, např. zkouškou reakce na oheň fasád středního rozměru, by se muselo pro určení požární uzavřenosti modifikovat. Jednou z možností by mohlo být měření teplot na hořícím povrchu a následný výpočet hustoty tepelného toku v závislosti na čase (kapitola 2.2.2).

5 Závěr

V rámci reakce na oheň fasád je požární uzavřenost jeden z nejpálčivějších problémů. Práce seznamuje s metodami pro určení požární uzavřenosti obvodových stěn. Druhou částí práce jsou experimenty v požárních zkušebnách a matematické modelování.

Jedním ze základních parametrů pro klasifikaci požární uzavřenosti obvodových stěn je splnění požadované požární odolnosti a druh konstrukční části. V případě, že konstrukce obvodové stěny nespĺňuje požární odolnost, je automaticky hodnocena jako požárně otevřená plocha. Obvodové stěny druhu konstrukčních částí DP1 a DP2 (bez další hořlavé povrchové úpravy) jsou většinou klasifikovány jako požárně uzavřené plochy, zatímco obvodové stěny druhu DP3 jsou hodnoceny jako požárně otevřené plochy. Požární uzavřenost lze určit několika způsoby:

1) Výpočtem

- numerickým výpočtem (množství uvolněného tepla, hustota tepelného toku);
- matematickým modelem.

2) Zkouškou

- zkouškou požární odolnosti;
- zkouškou reakce na oheň fasád;
- kónickou kalorimetrií.

Převážná část diplomové práce je zaměřena na experimenty. První je zaměřen na kónickou kalorimetrii. Jedná se o malorozměrovou zkoušku, při které je měřena rychlost uvolňování tepla, tedy hodnoty, kterou lze využít při stanovení požární uzavřenosti. Během řešeného příkladu byly s využitím kónického kalorimetru zkoušeny vzorky z omítnuté dřevovláknité desky. Vzorky byly zkoušeny z omítnuté strany a u všech došlo ke vznícení. U všech vzorků byla stanovena maximální hodnota rychlosti uvolněného tepla vyšší než $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ a nižší než $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, proto je skladba klasifikována jako částečně požárně otevřená plocha.

Druhý experiment se zabýval možností alternativně zkoušet požární uzavřenost. Byla navržena pec z pórobetonového materiálu s vyměnitelnou přední stěnou, ve které je umístěn otvor. Uvnitř pece je plynový hořák, jehož výkon je regulován tak, aby teplota v peci odpovídala normové teplotní křivce a teplota u nadpraží odpovídala křivce vnějšího požáru. Experiment je rozdělen na dvě části. V první části je popsáno řešení referenční zkoušky. V druhé části je k čelní stěně přikotven hořlavý obklad z OSB desky. Stanovení požární uzavřenosti na základě výsledků z navržené zkoušky není příliš vhodné, jelikož klasifikace požární uzavřenosti se stanovuje pomocí hustoty tepelného toku na hořícím povrchu.

Pro určení požární uzavřenosti obvodových stěn jsou normou dány mezní hodnoty množství uvolněného tepla a hustoty tepelného toku. Ačkoliv jsou stanovena kritéria pro požárně uzavřenou plochu, částečně a zcela požárně otevřenou plochu, není doposud jasná zkušební metodika.

Literatura

1. ČSN 73 0802. Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty; Z1 (2013). Praha : ÚNMZ, 2009.
2. ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení. Praha : ÚNMZ, 2016.
3. KAŠOVÁ, Kateřina. Bakalářská práce – Požární řešení objektu leteckého muzea s rozšiřující tematickou částí. Část druhá: Analýza podrobného výpočtu odstupové vzdálenosti z hlediska sálání tepla. Praha : Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2015.
4. Technické podklady Fermacell. Požární a akustický katalog: Konstrukce stěn, podlah a stropů. Praha : Fermacell GmbH, 2015.
5. POKORNÝ, Marek. Požární bezpečnost staveb – Syllabus pro praktickou výuku. Praha : ČVUT v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05456-7.
6. ČSN 73 0824. Požární bezpečnost staveb – Výchřevnost hořlavých látek. Praha : ÚNMZ, 1992.
7. KUČERA, Petr a PEZDOVÁ, Zdeňka. Základy matematického modelování požáru. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN: 978-80-7385-095-1.
8. HIRSCH, Charles. Numerical computation of internal and external flows – The fundamentals of computational fluid dynamics. Oxford (UK) : Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 978-0-7506-6594-0.
9. POKORNÝ, Marek. Disertační práce. Instalační šachty z požárního hlediska. Praha : ČVUT v Praze, 2012.
10. McGRATTAN, Kevin, a další. Fire Dynamics Simulator (Version 6) - User's Guide. [PDF] Gaithersburg, Maryland, USA : National Institute for Standards and Technology, 2013. Sv. Special Publication 1019 - Sixth Edition.
11. KARLSSON, Björn a QUINTIERE, James G. Enclosure fire dynamics. Boca Raton, Florida : CRC Press LLC, 2000. ISBN 0-8493-1300-7.
12. NAJMANOVÁ, Hana, HEJTMÁNEK, Petr a ŠEVČÍK, Libor. Rychlost uvolňování tepla jako parametr pro hodnocení chování materiálu při požáru. Materiály pro stavbu. 2015, 4.
13. HEJTMÁNEK, Petr. Tepelně-izolační materiály v dřevostavbách a jejich chování při požáru. Sborník anotací konference Juniorstav. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN: 978-80-214-4851-3.
14. LINDHOLM, Johan, BRINK, Anders a HUPA, Mikko. Cone calorimeter – A tool for measuring heat release rate. Åbo (Finland) : Åbo Akademi Process Chemistry Centre, 2009. 4B.
15. MANDINEC, Jan. Diplomová práce. Požárnětechnické charakteristiky dřeva v CFD modelech. Praha : ČVUT v Praze, 2016.
16. POKORNÝ, Marek. Vnější kontaktní zateplovací systémy z hlediska požární bezpečnosti staveb (část 1). TZB-info. [Online] Topinfo s.r.o., listopad 2014. [Citace: 2. květen 2016.] <http://www.tzb-info.cz/>. ISSN 1801-4399.
17. ČSN ISO 13785-1. Zkoušky reakce na oheň pro fasády – Část 1: Zkouška středního rozměru. Praha : ÚNMZ, 2010.
18. EN ISO 13785-2. Reaction to fire tests for facades - Part 2: Large-scale test. Addis Abeba : ESA, 2002.
19. POKORNÝ, Marek. Hlediska požární bezpečnosti dřevostaveb v České republice, 1. díl. TZB-info. [Online] Topinfo s.r.o., listopad 2013. [Citace: 2. květen 2016.] www.tzb-info.cz. ISSN: 1801-4399.
20. ČSN EN 1363-1. Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Praha : ÚNMZ, 2013.

21. ČSN EN 1365-1. Zkoušení požární odolnosti nosných prvků – Část 1: Stěny. Praha : ÚNMZ, 2013 Opr.1 (2013).
22. PAŠEK, Jan a SVOBODA, Jiří. Fyzikální aspekty použití nekontaktní termografie při analýze obvodových plášťů budov. Stavební obzor, ročník 13. [Online] ČKAIT, GRAND s.r.o., březen 2004. [Citace: 18. listopad 2016.] <http://www.profesis.cz/>. ISSN 1805-6032.
23. BRZOBOHATÝ, Tomáš. Diplomová práce. Měření emisivity vlhkých a suchých povrchů. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2012.
24. BRZOBOHATÝ, Lukáš. Bakalářská práce. Měření teploty. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2011.
25. SZMEK, Tomáš. Bakalářská práce. Měření teploty v technické diagnostice. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2008.
26. ČSN EN 60584-1 ed.2. Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance. Praha : ÚNMZ, 2014.
27. PŘIDAL, Oldřich. Bakalářská práce. Termočlánekový snímač teploty (TST). Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2008.
28. Wald, František a kolektiv. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha : ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
29. Všeobecná encyklopedie v osmi svazcích, svazek 6. Praha : DIDEROT, 2002. ISBN 80-86613-06-2.
30. MURTHY, TSAI a SAUNDERS. IOPscience. Metrologia, volume 35: High-heat-flux sensor calibration using black-body radiation. [Online] 1998. [Citace: 4. prosinec 2016.] <http://iopscience.iop.org/>. ISSN 1681-7575.
31. TFH dřevěné skeletové domy. [Online] 2016. [Citace: 5. květen 2016.] <http://www.tfh.cz/>.
32. DEKWOOD. STEICO protect – dřevovláknitá izolační deska. [Online] http://dekwood.cz/docs/dekwood_cz/dokumenty/steico_protect.pdf.
33. Baunit. Baunit StarContact Forte. [Online] březen 2014. <http://www.baunit.cz/upload/513>.
34. PROCHÁZKA, Jakub. Diplomová práce. Konstrukčně subtilní požární stěna s dřevěným rámem. Praha : ČVUT v Praze, 2016.

Seznam obrázků

obr. 1	Požár fotbalového stadionu Valley Parade v anglickém Bradfordu 11. května 1985 (zdroj: www.pozary.cz): a) na fotbalový zápas přišlo přes 11 000 diváků; b) z důvodu vysokého hodnotě uvolněného tepla vznikla linie, na které je teplo pro člověka únosné.....	1
obr. 2	Požár skanzenu Řepora na Praze 5 (zdroj: www.pozary.cz): a) zásah jednotek HZS v dýchací technice; b) jelikož jsou objekty v těsné blízkosti, dochází k rozšíření požáru na sousední objekty	2
obr. 3	Požár autocentra v Činěvsi (zdroj: nymbursky.denik.cz): a) situace autocentra s červeným vyznačením požárem zasažené části areálu; b) požár se s ohledem na zasaženou část nerozšířil na sousední objekty v obci.....	2
obr. 4	Druhy konstrukčních částí: a) konstrukce DP1, b) konstrukce DP2, c) konstrukce DP3 [3]	4
obr. 5	Půdorys požárního úseku kanceláře.....	6
obr. 6	Porovnání odstupových vzdáleností a jim odpovídajících požárně nebezpečných prostorů pro řešený příklad se stěnou hodnocenou jako: a) PUP, b) částečně POP, c) zcela POP	7
obr. 7	Vrstvy zohledněné ve výpočtu: a) konstrukční část druhu DP1; b) konstrukční část druhu DP2. Poznámka: Kóta X označuje vrstvy zohledněné při posouzení požární otevřenosti	8
obr. 8	Přehled modelů požáru v uzavřeném prostoru [7].....	10
obr. 9	Matematický deterministický model typu pole – CFD model.....	12
obr. 10	Schéma kónického kalorimetru [14].....	14
obr. 11	Zkušební zařízení pro středněrozměrovou zkoušku [17].....	18
obr. 12	Zkušební zařízení pro velkorozměrovou zkoušku: a) schéma zkušební tělesa, b) umístění měřících zařízení [18].....	19
obr. 13	Zkouška požární odolnosti nosné dřevěné obvodové stěny: pohled na vzorek (3 × 3 m) nastrojený mnoha povrchovými termoelektrickými články (mezní stav I); barevně vyznačeny zatěžovací lisy [19].....	21
obr. 14	Princip termočlánku: 1 – měřící spoj; 2 – srovnávací spoj; 3 – kompenzační obvod; α_A , α_B – dva vodiče s různým termoelektrickým součinitelem [25]	22
obr. 15	Konstrukce termočlánků: a) plášťového termočlánku [27], b) deskového termočlánku [20]	23
obr. 16	Snímače tepelného toku (zdroj: obrázky nahoře [30], obrázky dole www.sequoia.co.uk): a) Gardonův snímač; b) Schmidt-Boelterův snímač.....	25
obr. 17	Skladba obvodové stěny TFH [31].....	26
obr. 18	Schematický řez vzorkem s vyznačením teplotního namáhání	27
obr. 19	Zkušební vzorek: a) exponovaný povrch vzorku; b) neexponovaný povrch vzorku.....	27
obr. 20	Kónický kalorimetr v Technickém ústavu požární ochrany HZS ČR v Praze: a) pohled na kónický kalorimetr; b) popis na kónický zářič, váhy a držák vzorku	28
obr. 21	Vzorek: a) první část vzorku s neomítnutou stranou směrem nahoru; b) druhá část vzorku s neomítnutou stranou směrem dolů	29
obr. 22	Vzorek 1: a) vzorek před zkouškou v upevňovacím rámečku; b) ozařování vzorku kónickým zářičem; c) hoření vzorku v kalorimetru; d) vzorek po testu.....	30
obr. 23	Vzorek 2: a) upevnění vzorku v kalorimetru, b) vzorek po testu	31
obr. 24	Vzorek 3: viditelná deformace dřevovláknité desky s omítkou po zkoušce.....	31

obr. 25	Požární pec: a) referenční pec; b) modifikovaná pec s hořlavým obkladem.....	35
obr. 26	Rozmístění otvorů v požární peci: a) boční pohled; b) zadní pohled; čelní pohled.....	36
obr. 27	Referenční pec z nehořlavých materiálů: a) půdorys; b) podélný řez A; c) příčný řez B.....	37
obr. 28	Požární laboratoř 'FireLAB' na UCEEB ČVUT v Buštěhradu s polohou referenční pece: a) půdorys; b) řez.....	38
obr. 29	Průběh experimentu referenční pece: a) stavba zkušební pece; b) pohled dovnitř pece s umístěním plynového hořáku; c) zapálení hořáku v 0 s; d) vyšlechnutí plamene z pece.....	39
obr. 30	Vizualizace matematického modelu referenční pece v 25. minutě: a) hoření propanu na pískovém hořáku a vývoj kouře; b) vektorové proudění teplot v rovině $Y = 1,0$	41
obr. 31	Umístění hořlavého obkladu – OSB desky: a) půdorys pece; b) pohled na čelní stěnu.....	45
obr. 32	Průběh experimentu pece s hořlavým obkladem: a) zapálení hořáku v 0 s; b) zapálení OSB desky u pravého ostění v 2,5. min (150 s); c) šíření plamene v 7,5. min (450 s) – plamen 15 cm nad otvorem; d) šíření plamene v 15. min (900 s) – plamen 50 cm nad otvorem; e) šíření plamene v 25. min (1500 s) – plamen 85 cm nad otvorem; f) vypnutí hořáku v 3.0 min (180 s); g) odpadávání zuhelnatělé OSB desky – vytvoření torzního stínu; h) odhoření a odpadnutí hořlavého obkladu do výšky 25 cm nad nadpražím, rozšíření plamenů do výšky 90 cm nad nadpraží.....	46
obr. 33	Vizualizace matematického modelu pece s hořlavým obkladem v 20. minutě: a) hoření propanu na pískovém hořáku a vývoj kouře; b) vektorové proudění teplot v rovině $Y = 1,0$	49

Seznam tabulek

tab. 1	Příklady konstrukce druhu DP2 a DP3 jako požárně uzavřené plochy [4].....	5
tab. 2	Mezní hodnoty hustoty tepelného toku a množství uvolněného tepla [1].....	5
tab. 3	Porovnání zkoušky reakce na oheň fasád středního a velkého rozměru.....	17
tab. 4	Označení nejčastěji používaných termočlánků dle ČSN EN 60 584-1 [26].....	23
tab. 5	Určení teploty na povrchu vzorku (zdroj: Ing. Libor Ševčík, TÚPO HZS ČR).....	28
tab. 6	Celkové výsledky zkoušky dle ISO 5660-1.....	32
tab. 7	Úbytek hmotnosti u vzorků při a po zkoušce.....	33
tab. 8	Průběh experimentu referenční pece.....	39
tab. 9	Vlastnosti navržených materiálů pro referenční pec.....	41
tab. 10	Průběh experimentu pece s hořlavým obkladem.....	45
tab. 11	Vlastnosti navržených materiálů pro zkušební pec s hořlavým obkladem.....	50

Seznam grafů

graf 1	Základní 2 průběhy teplot v peci při zkouškách požární odolnosti stavebních konstrukcí [19].....	20
graf 2	Porovnání průběhů teplot v odtahovém potrubí v závislosti na čase.....	32
graf 3	Úbytek hmotnosti vzorku v průběhu zkoušky.....	33

graf 4	Rychlost uvolňování tepla (HRR)	34
graf 5	Porovnání teplot u experimentu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží s křivkou vnějšího požáru.....	40
graf 6	Hustota tepelného toku u experimentu referenční pece.....	40
graf 7	Porovnání teplot u matematického modelu referenční pece: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží s křivkou vnějšího požáru	42
graf 8	Matematický model referenční pece: a) hustota tepelného toku; b) tepelný výkon hořáku	43
graf 9	Porovnání teplot z experimentu a matematického modelu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží otvoru s křivkou vnějšího požáru.....	44
graf 10	Porovnání experimentu s matematickým modelem z hlediska hustoty tepelného toku pro: a) radiometr R_1; b) radiometr R_2.....	44
graf 11	Pec s hořlavým obkladem - porovnání teplot uvnitř pece matematického modelu s normovou teplotní křivkou.....	47
graf 12	Pec s hořlavým obkladem - porovnání teplot u nadpraží experimentu s křivkou vnějšího požáru	48
graf 13	Pec s hořlavým obkladem - hustota tepelného toku u experimentu.....	48
graf 14	Matematický model pece s hořlavým obkladem: a) porovnání teplot uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) porovnání teplot u nadpraží s křivkou vnějšího požáru.....	50
graf 15	Matematický model pece s hořlavým obkladem: a) hustota tepelného toku; b) tepelný výkon hořáku	51
graf 16	Porovnání teplot z experimentu a matematického modelu: a) uvnitř pece s normovou teplotní křivkou; b) u nadpraží otvoru s křivkou vnějšího požáru.....	52
graf 17	Porovnání experimentu s matematickým modelem z hlediska hustoty tepelného toku pro: a) radiometr R_1; b) radiometr R_2.....	52
graf 18	Porovnání teplot uvnitř pece pro: a) požární zkoušky; b) matematické modely	53
graf 19	Porovnání teplot u nadpraží otvoru v čelní stěně pece: a) při požárních zkouškách; b) u matematických modelů.....	54
graf 20	Porovnání hustoty tepelného toku: a) radiometr R_1 při požární zkoušce; b) radiometr R_2 při požární zkoušce; c) radiometr R_1 u matematického modelu; d) radiometr R_2 u matematického modelu.....	55