

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta bezpečnostního inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ostrava 2007

Kamil Havlíček

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva

Zkouška výcvikového trenažéru na spalování tuhých paliv

Student: Kamil Havlíček

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Hora

Studijní obor: Technika požární ochrany a bezpečnost průmyslu

Datum zadání diplomové práce: 7. listopadu 2006

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2007

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě, 30. dubna 2007

.....

Kamil Havlíček

Děkuji vedoucímu diplomové práce kpt. Ing. Janu Horovi za jeho vedení a cenné rady poskytnuté v průběhu zpracování diplomové práce, Ing. Bohdanu Filipimu, PhD za realizaci měření a plk. Ing. Petru Ošlejškovi a jeho kolegům za umožnění a pomoc při realizaci zkoušek v trenažéru.

Anotace

Havlíček, K.,: *Zkouška výcvikového trenažéru na spalování tuhých paliv*: diplomová práce.
Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2007, 58 stran

Klíčová slova: flashoverový kontejner, měření, flashover, bezpečnost

Diplomová práce řeší problematiku zkoušky v trenažéru spalujícího tuhá paliva. Úvod práce se zabývá definováním pojmů nelineárního šíření požárů, obsahuje minimum znalostí dynamiky požáru frekventanta výcviku a představuje zařízení simulující podmínky požáru v uzavřených prostorech jako takové.

Druhá část práce se věnuje přípravě, realizaci a vyhodnocení zkoušky v trenažéru na spalování tuhých paliv.

Cílem práce je ověřit funkčnost a bezpečnost prvního zařízení simulující podmínky požáru v České republice.

ANOTATION

Havlíček, K., *Test of Training Trainer on Solid Fuel Combustion*: Thesis.
Ostrava: Faculty of Safety Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2007, 58 p.

Keywords: Flashover container, measurement, flashover, safety

This thesis deals critical condition, preparing and performance test of training trainer on solid fuel combustion. Introduction is about extreme fire behaviour and minimal knowledge of fire dynamics for participant of training.

Second part of work deals preparing and performance of the test.

Propose of the work is to verify of functionality and safety of the first equipment in the Czech republic.

1	ÚVOD.....	1
2	REŠERŽE LITERATURY.....	2
3	POJMY NELINEÁRNÍHO ROZVOJE POŽÁRU	4
3.1	Backdraft	4
3.2	Flashover.....	4
3.3	Fire gas ignition	5
4	MINIMUM DYNAMIKY POŽÁRU PRO VÝCVIK V TRENAŽÉRŮ [2]	6
4.1	Iniciace	7
4.2	Plamenné hoření a žhnutí.....	8
4.2.1	Šíření plamene po povrchu.....	8
4.3	Rozhořívání.....	8
4.3.1	Vzestupný proud zplodin hoření a horní horká vrstva.....	9
4.3.2	Plamen.....	9
4.3.3	Tlakové poměry.....	10
4.4	Flashover.....	11
4.4.1	Příčina flashoveru.....	11
4.4.2	Indikátory flashoveru	12
4.5	Plně rozvinutý požár	12
5	TRENAŽÉRY PRO VÝCVIK V PODMÍNKÁCH POŽÁRU V UZAVŘENÝCH PROSTORÁCH.....	13
5.1	Plynná paliva	14
5.2	Pevná paliva.....	14
5.2.1	Dřevo.....	15
5.2.2	Toxicita spalovaného materiálu.....	16
6	POPIS TRENAŽÉRU HZS OLOMOUCKÉHO KRAJE	17
6.1	Umístění trenažéru.....	17
6.2	Funkční a dispoziční členění.....	17
6.2.1	Obvodové konstrukce.....	18
6.2.2	Nosné konstrukce	19
6.2.3	Podlaha.....	19
6.2.4	Uzávěry otvorů a odvětrání	19
6.2.5	Speciální zařízení	20
7	NÁVRH MĚŘENÍ A ZKOUŠEK	21

7.1	Návrh měření podle návrhu technického měření [8]	21
7.2	Návrh měření v trenažeru HZS Olomouckého kraje.....	21
7.2.1	Měření teplot	22
7.2.2	Měření hustot toku tepla.....	23
7.2.3	Koncentrace vybraných zplodin hoření.....	23
7.2.4	Vizuální záznam	24
7.2.5	Vývoj neutrální roviny	24
7.2.6	Termovizní záznam	24
7.3	Konečná konfigurace přístrojů a zařízení při měření.....	24
7.4	Přehled měřících přístrojů a zařízení použitých při měření	25
8	PROVEDENÍ PRAKTICKÉ ZKOUŠKY	26
8.1	Příprava zkoušky	26
8.2	Bezpečnostní opatření při zkouškách	27
8.3	Konfigurace ventilačních otvorů a paliva	28
8.4	Iniciace paliva	29
9	PŘEDPOKLÁDANÉ PARAMETRY POŽÁRU V TRENAŽERU	40
9.1	Předběžný odhad výkonu zařízení potřebného pro flashover	40
9.3	Výpočet neutrální roviny	41
9.4	Výška plamenů a tepelné sálání	42
9.5	Orientační stanovení tepelného toku [26]	43
9.6	Teplota vzestupného proudu horkého kouře	44
9.7	Výpočet teploty po flashoveru [28]	45
10	DISKUSE.....	46
10.1	Princip 1. a 2. zkoušky	46
10.2	Princip 4. a 5. zkoušky	47
10.3	Rozdíly mezi 1. a 2. zkouškou.....	48
10.4	Rozdíly mezi 4. a 5. zkouškou.....	49
11	KRITICKÉ PARAMETRY URČUJÍCÍ BEZPEČNOST VÝCVIKU V KONTEJNERU	50
11.1	Návrh bezpečnostních opatření pro 1. a 2. zkoušku.....	54
11.2	Návrh bezpečnostních opatření pro 4. a 5. zkoušku.....	54
12	ZÁVĚR	55

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK, OBRÁZKŮ A GRAFŮ	60
SEZNAM PŘÍLOH.....	61

1 Úvod

Výcvik v podmínkách požáru v uzavřeném prostoru je v současnosti velmi rozšířeným druhem odborné přípravy. Umožňuje hasičům získat potřebné znalosti a osvojit si praktické dovednosti k bezpečnému a efektivnímu zdolávání především bytových požárů. Původně švédský systém odborné přípravy se postupně rozšířil téměř do celého světa. V Evropě je využíván ve všech vyspělých státech EU, např. Švédsku, Finsku, Německu, Polsku, Velké Británii, Francii. Výcvik je prováděn v trenažérech, obvykle jednoduchém systému konstrukčně založeném na standardních přepravních kontejnerech.

Ačkoliv mnohé země přistoupili ke koncepci plošného zavádění těchto trenažérů v České republice není, v provozu jediné obdobné zařízení. Plošné zavedení trenažérů je nutné pro zvyšování vycvičenosti a připravenosti jednotek požární ochrany zejména v současné situaci neustále klesajícího počtu požárů.

Provoz trenažérů vytváří prostor pro systematické ověřování a zavádění nových taktických postupů a věcných prostředků u jednotek PO v rámci celé ČR. Trenažér je svou podstatou plně využitelný pro výzkum v oblastech požární dynamiky, požární taktiky a sdílení tepla. Experimenty nejsou finančně náročné.

Pro splnění všech požadovaných funkcí a cílů musí veškeré trenažéry fungovat bezpečně a spolehlivě, proto má být každý trenažér před uvedením do provozu podroben funkční zkoušce.

Cíl práce spočívá v provedení návrhu funkční zkoušky trenažéru na spalování tuhých paliv, provedení a vyhodnocení této zkoušky na reálném zařízení. Zkouškou má být ověřena bezpečnost a plnění požadovaných výcvikových funkcí trenažéru před jeho uvedením do provozu.

2 Rešerže literatury

Gojkovic D., Initial Backdraft Experiments, Report 3121, Department of Fire Safety Engineering, Lund university, Švédsko, 2000, 54 s., ISSN 1402-3504

Práce je závěrečnou zprávou o činnosti velkorozměrového experimentálního zařízení, v němž proběhlo 13 pokusných backdraftů se zemním plynem. Gojkovič měří nejdůležitější veličiny dynamiky požáru v uzavřeném prostoru: Teploty, tlaky, poměry plynů a hmotnostní úbytky.

Fleischmann C. M., Backdraft Phenomena, NIST-GCR-94-646, University of California , Berkley, USA, 1994

Významná práce, v níž je shrnuta dynamika backdraftu. Kromě pokusů v laboratorním prostředí a na zmenšených zařízeních je zdůrazněn význam hustotního proudění pro směšování paliva se vzdušným kyslíkem. Z práce vyplývá nutnost provádět další výzkumy s velkorozměrovými zařízeními a reálnými palivy.

Quintiere J. G., Principles of Fire Behavior, ISBN 0-8273-7732-0 Delmar Publisher

Publikace známého autora popisuje jednoduchým způsobem základní jevy a vztahy dynamiky požáru.

Grimwood P., Hartin E., McDonough J., Rafael S.,
3D Fire Fighting – Training, Techniques, and Tactics

Autoři knihy jsou zkušení hasiči, kteří přenášejí do svých publikací praktické poznatky hasičů a vědců z celého světa. V knize 3D Fire Fighting jde především o porozumění jevů nelineárního rozvoje požáru a aplikaci účinných taktických postupů při hašení v uzavřených prostorech. Pro potřeby diplomové práce jsou rovněž také využitelné statistické údaje uvedené v knize. Práce zdůvodňuje a popisuje moderní taktické postupy, zejména odbornou přípravu v tzv. Flashoverových kontejnerech.

FLASH OVER SIMULATOR, FUNCTION AND SAFE USE

Tutkimuskeskus V. T., Technical Research Centre of Finland

Práce shrnující finský výzkumný projekt pro švédský hasičský sbor. Podstatou výzkumu bylo zjišťování parametrů flashoverového kontejneru s ohledem na jeho bezpečný a efektivní provoz. Bylo provedeno celkem 27 testů s různými palivy (propan a různé dřevěné materiály). V rámci projektu bylo rovněž vytvořeno výukové video pro potřeby instruktorského sboru s malorozměrovým kontejnerem.

3 Pojmy nelineárního rozvoje požáru

V diplomové práci se často uvádějí pojmy charakterizující specifické jevy nelineárního šíření požáru. Tyto pojmy mají mnohé znaky podobné, a proto se často zaměňují. Pro upřesnění a lepší pochopení dále zmiňovaných jevů uvádím definice uznávaných mezinárodních organizací působících na úseku PO.

3.1 *Backdraft*

Backdraft nemá definici International Standart Organisation (dále jen ISO), ovšem definují jej National Fire Protection Asociation (USA) a Institution of Fire Engineers (GB).

Definice Institution of Fire Engineers:

„Backdraft je exploze většího nebo menšího rozsahu, způsobená vniknutím čerstvého vzduchu z jakéhokoliv zdroje nebo příčiny do hořící budovy, kde probíhá hoření za nedostatku vzduchu.“ [23]

Definice National Fire Protection Asociation:

„Backdraft je exploze nebo rychlé hoření vznětlivých plynů, která nastává, pokud je kyslík přiveden do budovy, která není dostatečně větraná a v níž je z důvodů požáru nedostatečný obsah kyslíku.“ [23]

3.2 *Flashover*

Pro flashover existuje platná definice ISO:

„Rychlé vzplanutí veškerého hořlavého materiálu v místnosti zasažené požárem.“ [7]

Kromě ISO jej definuje například organizace InterFIRE: „Fáze požáru, kde většina nespálených plynných produktů pyrolýzy a paliva obsahujícího celulosu (nábytek a podlahové krytiny) v místnosti dosáhnou téměř současně teploty vzplanutí a vzplane. Teplota, při které flashover nastává, je přibližně 600 °C. Když nastane flashover, veškeré palivo v místnosti hoří a teplota dosahuje maximálních hodnot.“ InterFIRE je organizace podporující zjišťovatele příčin požáru, která na svých internetových stránkách rovněž uvádí „vědecky přesnou“ definici jevu: „Přechodná fáze v rozvoji sledovaného požáru, ve které povrchy vystavené

expozici tepelné radiace dosáhnou iniciační teploty více či méně současně a požár se rychle rozšíří v celém prostoru.“

Nelineární jevy rozvoje požáru jsou vzájemně často zaměňovány. Základní rozpoznávací znaky jsou dle mého názoru:

Kritérium	Flashover	Backdraft
Tlakové projevy	Nepatrné	Ano (roztříštění skleněných výplní, destrukce neodolných stavebních prvků atd.
Množství kyslíku	Dostatečné	Nedostatečné
Četnost jevů	Často	Málo obvyklý jev [7]

tabulka 1:Srovnání flashoveru a backdraftu

3.3 Fire gas ignition [7]

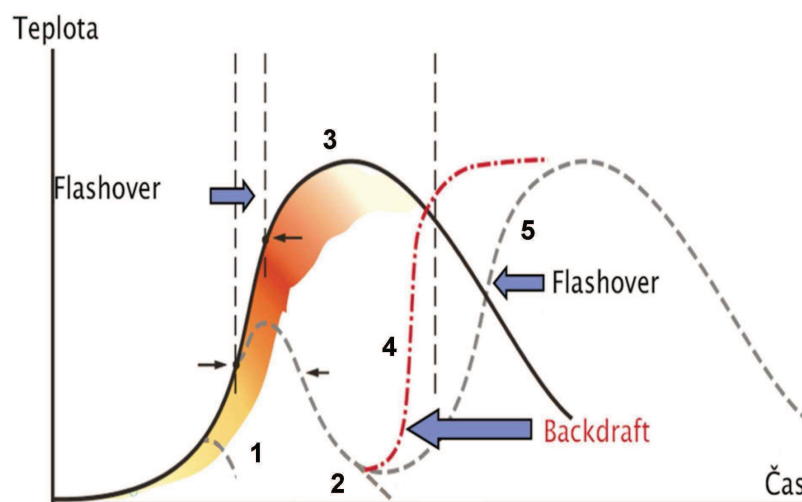
Je proti flashoveru a backdraftu všeobecně méně známým pojmem. Opět pro něj neexistuje ISO definice. Jeho definování se na základě výsledků výzkumů provedených v jednotlivých státech liší. Grimwood se pokusil nalézt vhodné vyjádření tohoto jevu napříč „národními“ definicemi a vyjádřil daný jev právě takto: „Pokud uniknou spaliny hoření do prostoru přilehlému k prostoru, v němž probíhá hoření, mohou se velmi dobře promísit s okolním vzduchem. Tato směs může vyplnit celý nebo jen část prostoru a může se nacházet v příslušných mezích výbušnosti. Jestliže je směs iniciována, vyvolává následné hoření velký nárůst tlaku.“ [7]

Následující definice popírá časté přiřazování backdraftu jako specifické podskupiny fire gas ignition. Identifikačním bodem se stává opět rozdíl ve ventilaci požáru. Definice backdraftu předpokládá pro jeho vznik změnu ventilačních poměrů v těsném prostoru zasaženém požárem. Naproti tomu definice fire gas ignition popisuje jev, který nastává bez změny ventilačních poměrů. Druhý podstatný rozdíl spočívá ve vytvoření výbušné (hořlavé) koncentrace. U backdraftu dochází k promísení oxidačního prostředí a paliva v prostoru požáru. Fire gas ignition lokalizuje směřování paliva se vzduchem vně požárem zasaženého prostoru.

4 Minimum dynamiky požáru pro výcvik v trenažérů [2]

Je zřejmé, že požár ve vnitřním prostoru může nabývat nekonečně mnoha konkrétních podob. Nicméně je možné uvést několik základních scénářů takového požáru:

1. Požár se nerozšíří na další hořlavý materiál. Vyhoří pouze iniciované palivo.
2. Požár s nedostatkem okysličovadla. Hoření může být velmi pomalé nebo přejít ve žhnutí, postupně zcela uhasne.
3. Volný rozvoj požáru v uzavřeném prostoru. Požár má dostatečnou ventilaci a množství paliva. Následuje rozšíření na veškerý hořlavý materiál v prostoru.
4. Plamenné hoření může být velmi pomalé nebo přejít ve žhnutí. Při přivedení okysličovadla dojde ke vzniku backdraftu.
5. Plamenné hoření může být velmi pomalé nebo přejít ve žhnutí. Při přivedení okysličovadla dojde k novému rozhoření paliva s následným flashoverem. Požár má dostatečnou ventilaci a množství paliva. Následuje rozšíření na veškerý hořlavý materiál v prostoru.
6. Plamenné hoření může být velmi pomalé nebo může přejít ve žhnutí. Při přivedení okysličovadla dojde ke vzniku spontánní iniciace směsi produktů pyrolýzy a okysličovadla.



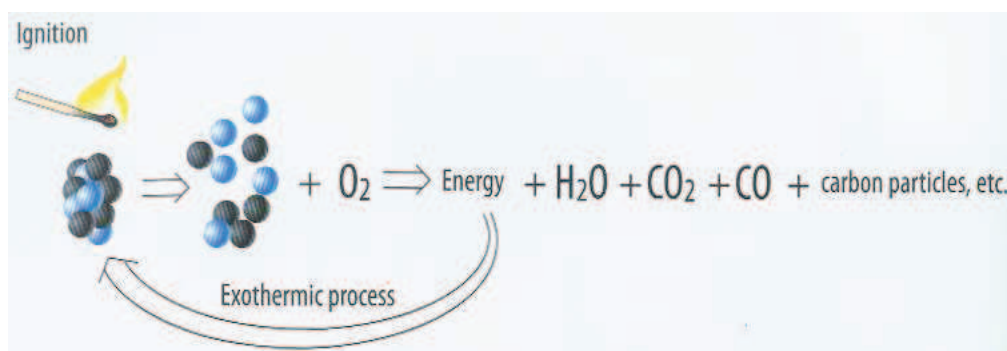
Obrázek 1: Teplotní křivky výše uvedených scénářů požárů (dle čísel)[2]

4.1 Iniciace

„Všechny požáry jsou na počátku malými“ [2]

Iniciačním zdrojem nazýváme takový zdroj energie, který je schopen uvolnit takové její množství, které je dostatečné pro zpuštění chemické reakce hoření. Iniciačním zdrojem může být předmět, který zapříčinil požár (například zapnutá žehlička ponechaná bez dozoru). Vždy rozlišujeme mezi iniciačním zdrojem a příčinou požáru. Jako příčiny požáru uvádíme: Nedbalost, úmyslné zapálení a technické závady [19].

Hoření je chemická oxidačně redukční reakce, které se účastní palivo a oxidační prostředky a z které vzniká teplo, světlo a produkty reakce (oxidy, vodní pára, saze).



Obrázek 2: Zobrazení chemické reakce hoření [2]

Iniciace je první zřetelně viditelným znakem hoření. Hořlavé materiály, na které působí dostatečné teplo mohou vzplanout (s přítomností plamene) nebo se mohou vznítit (bez přítomnosti plamene). Teplo působí na materiál prouděním (konvekcí), sáláním (radiací) nebo vedením (kondukcí). Každý pevný hořlavý materiál je iniciován během tzv. indukční periody. Indukční perioda je doba, za kterou hořlavý materiál, akumuluje kritické množství energie, dostatečné k tomu, aby se uvolnilo takové množství hořlavých produktů pyrolýzy, které stačí k tomu, aby došlo k jeho dalšímu hoření nebo žhnutí. Délka indukční periody závisí na součiniteli prostupu tepla – na tepelné vodivosti, na hustotě a na tepelné kapacitě materiálu.. V praxi to znamená, že například porézní hmota s nižším součinitelem prostupu tepla bude teplo kumulovat a proto dříve vzplane.

4.2 Plamenné hoření a žhnutí

Plamenné hoření nastává pokud se nachází palivo i oxydant ve stejném skupenství, např. vzdušný kyslík a produkty pyrolýzy dřeva. Ke žhnutí dochází, pokud se palivo a oxydant nenachází ve stejném skupenství, např. pevný povrch dřevěné desky a vzdušný kyslík. Plynná a kapalná paliva nejsou schopná žhnutí, pouze plamenného hoření.

4.2.1 Šíření plamene po povrchu

Šíření plamene po povrchu ovlivňují vlastnosti látky jako součinitel prostupu tepla [18], geometrie povrchu hořlavého materiálu, orientace povrchu hořlavého materiálu a okolní prostředí.

Největší rychlost šíření po povrchu dosahuje hoření tam, kde je nejvýhodnější bilance tepelných ztrát, např. v rohu místnosti. Se zmenšujícím se úhlem je zaznamenávána větší rychlost. Při této konfiguraci paliva působí na zónu přípravy největší množství produkovaného tepla.

Orientace povrchu hořlavé látky je schopna ovlivnit délku plamenů a je důležitá pro působení na pásmo přípravy. Nejlip se plamen po povrchu šíří pod stropem a to s ohledem na kumulaci nespálených plynů a proudění v horní části prostoru. Dobře se plamen po povrchu šíří směrem nahoru, naopak špatně směrem dolů.

Okolní prostředí, resp. teplota okolního prostředí může ovlivnit množství vývinu hořlavých plynů z materiálu a přispět tak ke zvětšení rychlosti šíření plamene po povrchu.

4.3 Rozhořívání

Pokud má požár dostatek vzdušného kyslíku, jeho další propagace záleží na množství paliva. Proto se takový požár označuje za řízený palivem. Rozhořívání požáru je charakterizováno tvorbou horké vrstvy kouře pod stropem zasažené místnosti. V této vrstvě se kumulují nespálené pyrolýzní produkty. Při iniciaci nespálených plynů v horní horké vrstvě kouře dochází k rychlému šíření požáru a nárůstu tlaku.

4.3.1 Vzestupný proud zplodin hoření a horní horká vrstva

Produkty pyrolýzy o velké teplotě se mísí nad povrchem materiálu s okysličovadlem a hoří. Část produktů pyrolýzy neshoří a pouze se díky své malé hustotě (vysoké teplotě) dostane vzestupným proudem do horní vrstvy. Samotný proud zplodin hoření se tvoří při šíření difusních plamenů napříč hořlavým materiálem a je závislý na rychlosti uvolňovaného tepla. Dělí se na pásma:

A – proud plynů nad plameny

B – fluktuující plameny

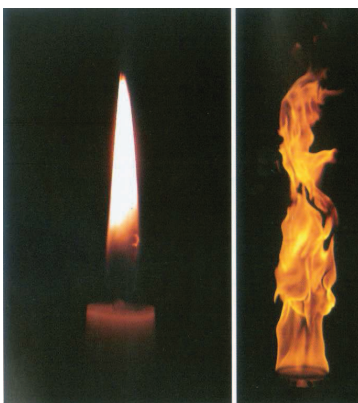
C – trvale přítomné plameny

Hmotnostní tok zplodin hoření dále zvětšuje přisávaný okolní vzduch, který se nezapojuje do reakce hoření. Kromě vzduchu jsou ve vzestupném proudu zplodin hoření přítomna všechna skupenství látek: plyny (CO_2 , CO , H_2O , CH_4 a další), pevné látky saze (C) a kapaliny (uhlovodíkové frakce - dehet) [17].

Horní horká vrstva plynů působí spolu s plamenem na povrch ostatních doposud nehořících předmětů a zahřívá je. Dochází k tepelnému rozkladu a uvolňování dalších produktů pyrolýzy. Čím větší je rychlost hmotnostního úbytku paliva a menší hmotnostní tok přiváděného vzduchu, tím vzniká více nespálených plynů a sazí. Nespálené plyny se kumulují v horní horké vrstvě kouře.

4.3.2 Plamen

Kinetický plamen vzniká promícháním paliva a oxidovadla před iniciací samotného hoření. Vzniklá směs hoří velmi rychle s velkým tepelným výkonem.

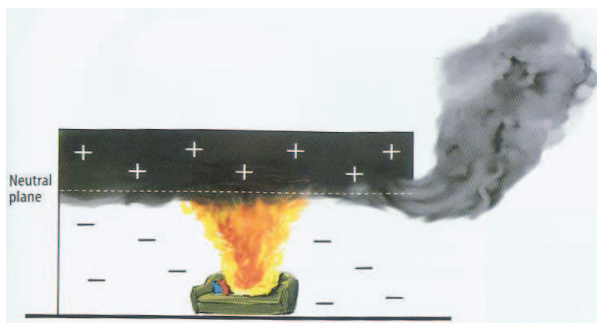


Obrázek 3: *Plamen difusní laminární a difusní turbulentní*

Difusní plamen vzniká postupnou difúzí oxidovadla a paliva do reakční zóny. Rozlišujeme laminární a turbulentní difúzní plamen.

4.3.3 Tlakové poměry

Tlakové poměry mají zásadní vliv na pohyb kouře a výšku neutrální roviny. Tlakové poměry mezi vnitřním prostorem budovy a vnější atmosférou jsou rozdílné i při běžných podmínkách bez požáru (výška místnosti, vnější – vnitřní teplota, vítr). V podmínkách požáru vznikají výrazné rozdíly v tlaku způsobené tepelnou roztažností a vztlakem horkého kouře o nízké hustotě.



Obrázek 4: Tlakové poměry v dobře větraném prostoru[2]

Tři základní scénáře požáru v uzavřeném prostoru

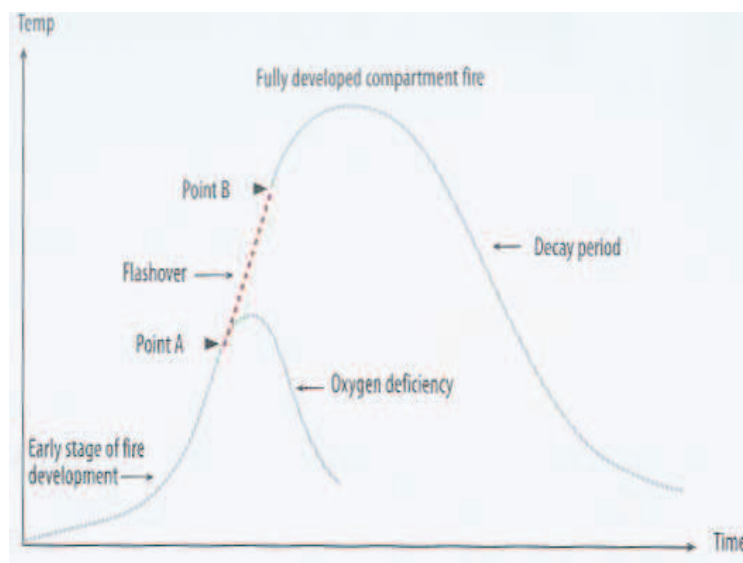
1. Požár v uzavřené místnosti. V místnosti panuje přetlak, který odpovídá velikosti rozdílu teplot mezi vnějším a vnitřním prostředím.
2. Požár v místnosti s okny. Tvoří se horní horká vrstva kouře (vyšší tlak proti okolí) a spodní chladná vrstva přiváděného vzduchu (nižší tlak proti okolí). Tento tlakový rozdíl umožňuje horkému kouři unikat otvory nad neutrální rovinou z místnosti a nižší tlak spodní chladné vrstvy otvory nebo částmi otvorů pod neutrální rovinou.
3. Při explozivním hoření v uzavřeném prostoru dochází k velkému nárůstu tlaku a hrozí poškození konstrukcí.

4.4 Flashover

Fáze přechodu od rozhořívání k plně rozvinutému požáru. Kritické parametry prostoru požáru umožňující vznik flashoveru závisí na:

- velikosti prostoru,
- součiniteli prostupu tepla konstrukcí,
- ventilačních otvorech,
- na množství a druhu hořlavých materiálů (povrchů).

Všechny tyto skutečnosti ovlivňující požár umožní zvyšování rychlosti vývinu tepla a hodnot tepelné radiace z horní horké vrstvy do té míry, že teploty povrchů vystavených tepelné expozici dosáhnou přibližně ve stejném časovém okamžiku teploty, která je dostatečná pro jejich iniciaci. Kritické parametry požáru, při kterých flashover nastane, se dle výsledků experimentů pohybují mezi 445 až 771 °C pro teplotu horní horké vrstvy a 15 až 35 kW/m² pro hustotu tepelného toku.



Obrázek 5: Znáznornění flashoveru na křivce [2]

4.4.1 Příčina flashoveru

Při rozvoji požáru za vhodných ventilačních poměrů a při dostatku paliva dochází k postupnému zvětšování rychlosti hmotnostního úbytku a nárůstu podílu nespálených pyrolýzních produktů, které se neúčastnili hoření v reakční zóně v horní horké vrstvě plynů.

Na rozhraní horní horké vrstvy dochází vlivem proudění a difúze k promíchávání nespálených produktů pyrolýzy a vzdušného kyslíku. Tato skutečnost vede ke vzniku rolloveru, tj. ke vzniku difusního hoření ve vrstvě kouře. Zvyšuje se hodnota hustoty tepelného toku z horní horké vrstvy nad kritickou hodnotu pro vznik flashoveru.

4.4.2 Indikátory flashoveru

1. Teplota v místnosti prudce vzrůstá
2. Neutrální rovina klesá
3. Začínají se objevovat plameny pod stropem
4. Zvětšuje se množství unikajícího kouře z otvorů
5. Pozorujeme vývin produktů pyrolýzy z nehořících předmětů namáhaných působením tepla
6. Plamen se začíná šířit pod stropem

4.5 Plně rozvinutý požár

Po flashoveru nastává fáze plně rozvinutého požáru. Během flashoveru přechází hoření řízené palivem v hoření řízené ventilací. Tento fakt je patrný například v realizaci hoření části nespálených produktů pyrolýzy vně zasaženého objektu. Délka trvání plně rozvinutého požáru závisí na množství paliva. Teploty běžně dosahují 800 – 900 °C a pokud je dostatek paliva a oxidovadla neklesají.

V této fázi je tepelné namáhání konstrukcí největší. Ve svých důsledcích může zapříčinit až ztrátu jejich únosnosti a stability a následné zřícení. Požár ve třetí fázi ovlivňuje zejména:

- množství a druh hořlavého materiálu,
- hustota, tvar a uspořádání hořlavého materiálu,
- množství přiváděného vzduchu,
- velikost a geometrie prostoru,
- požární odolnost konstrukcí.

5 Trenažéry pro výcvik v podmínkách požáru v uzavřených prostorách

Častěji nazývané flashoverové kontejnery. Jsou výcvikové systémy reprezentující více než 20 let soustavného vývoje a aplikace poznatků z dynamiky požáru, osobních ochranných zásahových prostředků hasiče a technických prostředků [6]. Trenažér se skládá z upravených standardních přepravních kontejnerů. V zásadě můžeme konstatovat, že v dnešní Evropě se dají kontejnerové trenažéry dělit podle účelu použití a používaného paliva.

Backdraftové kontejnery jsou jednoduché dobře tepelně izolované trenažéry umožňující navodit backdraft pro účely vědeckých měření nebo výcviku. Pro jednotky PO je zejména cenná možnost získat povědomí o principu, indikátorech a projevech tohoto jevu.

Flashoverové kontejnery jsou charakteristické vnitřním dělením na výcvikový a spalovací prostor. Spalovací prostor slouží k uložení a spalování paliva nejen na podlahu ale také jako obložení stropu a stěn v jejich horní polovině. Dělí se na útočné a pozorovací kontejnery. Liší se svým technickým provedením, které umožňuje splňovat danou funkci. Spalovací část bývá obvykle nadsazena nad částí pozorovací.

V trenažérech německých sborů často oddělují výcvikový a spalovací prostor vrata, které mimo jiné slouží ke generování žíhavých plamenů. Principem žíhavých plamenů je po uzavření vrat výrazné omezení hmotnostního toku okysličovadla. Nedostatkem okysličovadla difundujícím do reakční zóny vzniká kumulace značného přebytku nespálených produktů pyrolýzy ve spalovacím prostoru. Po otevření vrat dojde k úniku produktů pyrolýzy do výcvikového prostoru, jejich smísení se vzdušným kyslíkem a vyhoření v horní části výcvikového prostoru.

Trenažéry často vznikají svépomocí nebo z iniciativy jednotlivých sborů. Existuje i několik firem, které mají flashoverové kontejnery ve svém výrobním programu. Nejdále je v tomto ohledu v Evropě firma Draeger Safety se svou řadou trenažérů Dragon.



Obrázek 6:*Trenažér Dragon*[20]

5.1 Plynná paliva

Dalším důležitým kritériem trenažéru je použité palivo. Plynné palivo umožňuje velmi dobrou kontrolu rychlosti uvolňování tepla na úkor skutečných projevů požáru (např. tvorba neutrální roviny) [8] a je bezpochyby dražší v pořizovacích i provozních nákladech. Nutno také dodat, že případná havárie plynového zařízení může mít vzhledem k velkým výbuchovým parametrům plyných paliv vážné následky. Vzhledem k omezeným finančním možnostem při realizaci trenažéru se dále neuvažovalo o plyných palivech.

5.2 Pevná paliva

Z pevných paliv se ve světě při výcviku v provozu obdobných trenažérů běžně užívají pouze dřevěné palety nebo dřevotřískové desky, proto bylo pro realizaci funkční zkoušky také zvažováno spalování dřevní hmoty v podobě těchto dvou druhů paliv. Jako nejdůležitější hledisko, kromě dostatečné rychlosti uvolňování tepla a ostatních zplodin hoření

umožňujících výcvik a měření v reálných podmínkách požárů, byla především brána v potaz toxicita konkrétních paliv.

5.2.1 Dřevo

Dřevo se skládá z 48 – 56% z celulózy, 23 – 25% z hemicelulózy a 26 – 35% z ligninu (hodnoty pro jehličnaté stromy) [9]. Smrkové dřevo používané v paletách má výhřevnost 13,1 MJ/kg při měrné hmotnosti 575 kg a vlhkosti 25 % (tabulka s ostatními vlastnostmi vybraných druhů dřev viz. příloha) [21]. Dřevo se řadí mezi běžně dostupné obnovitelné zdroje. Pro účely výcviku přináší především následující výhody:

- snadná dostupnost,
- relativně nízká cena (především odpadové dřevo),
- oproti plastickým hmotám minimální toxicita produktů hoření,
- při hoření se neroztéká a neodkapává,
- zuhelnatělé zbytky po hoření se snadno odstraňují z prostoru trenažéru,
- nespálené zbytky jsou komunální odpad,
- při reálných požárech se podílí na jevech nelineárního rozvoje – reálnost výcviku,
- při tepelném rozkladu tvoří velké množství produktů pyrolýzy využitelných při výcviku.

Palety

Mají široké využití v dopravě a skladování. Typizovaná europaleta má rozměry: - délka 1200 mm, šířka 800 mm, výška 140 mm a hmotnost přibližně 20 kg. Běžně dostupné jsou i atypické palety. Jedinou anorganickou příměsí je v zanedbatelné míře kovový spojovací materiál.



Obrázek 7:Typizovaná europaleta

Dřevotříska

Dřevotříska jsou slisované a slepené dřevěné třísky. V dnešní době existuje spousta technologií výroby tohoto oblíbeného nábytkářského a stavebního materiálu. Dřevotřískové tabule jsou k dostání ve standardních rozměrech: 2750 × 2070 mm, 2750 × 1830 mm a šířkách od 2 do 38 mm [22].

Dřevotřískové tabule se od spalování dřevěných palet liší především:

- vyšší cenou,
- homogenností materiálů,
- umožňuje v různých zkouškách stále stejnou konfiguraci paliva v prostoru

5.2.2 Toxicita spalovaného materiálu

Po porovnání toxických vlastností jednotlivých zplodin hoření [25,15,12,13] nebyly doporučeny k používání dřevotřískové tabule. Pojivem dřevěných třísek je močovinoformaldehyd, který při hoření uvolňuje nebezpečný formaldehyd [12] s akutními i chronickými účinky. Organismus hasiče je v průběhu výkonu služby zatěžován působením množství toxických látek. Z tohoto důvodu se domnívám, že je žádoucí omezit na minimum vystavení hasiče toxickým látkám při výcviku a nepoužívat tedy dřevotřískové palivo.

6 Popis trenažéru HZS Olomouckého kraje

6.1 Umístění trenažéru

Trenažér se nachází v okrajové části obce Hamry na hranicích vojenského újezdu. Skladový areál je využíván Hasičským záchranným sborem (dále jen HZS) Olomouckého kraje. Areál nabízí ideální podmínky pro zázemí výcviku a skladování paliva pro trenažér. Probíhající výcvik nijak neomezuje nebo neohrožuje obyvatele obce.



Obrázek 8: Červený kruh vymezuje skladové prostory HZS Ol. kraje, modrý bod označuje umístění trenažéru [24]

6.2 Funkční a dispoziční členění

Celý trenažér tvoří:

- topeniště,
- výcvikový prostor,
- backdraftový prostor,
- soustava pro vstup a odvětrání,
- soustava pro nouzové odvětrání.



Obrázek 9: *Trenažér Hamry u Prostějova*

6.2.1 Obvodové konstrukce [8]

Obvodové konstrukce celého trenažéru zajišťují dva spojené ISO kontejnery běžně používané v dopravě. Kontejner tvořící výcvikový prostor má rozměry 2500 x 2500 x 12000 mm. Topeniště a backdraftová část představuje upravený kontejner o rozměrech 2500 x 2500 x 6000 mm. Kontejnery jsou spalovací a výcvikovou částí spojeny (viz. PŘÍLOHA I). Plášť kontejnerů se skládá z profilovaného plechu.

Stěny a strop topeniště jsou vzhledem k navození podmínek reálného požáru v uzavřeném prostoru a k minimalizaci tepelných ztrát sdílením tepla provedeny v sendvičové konstrukci stěn: Vnější plech, izolace z minerální vlny, vyzdívka z pórobetonu a vnitřní plech. Sendvič je umístěn v rámu a jištěn proti posunu vzniklém působením tepla navařenými železnými kotvami procházejícími všemi vrstvami.

Konstrukce stropu a uzávěrů je zeslabena o pórobetonovou vyzdívku a skládá se z vnějšího plechu, minerální vlny a vnitřního plechu. Tloušťka plechu je znázorněna v nákresu trenažéru. Vnitřní krytí pórobetonové vyzdívky ve stěně s vraty odděluje výcvikový a spalovací prostor je zčásti pokryt také trapézovým plechem, který zůstal po vytvoření otvoru pro přechod výcvikové a spalovací části.

6.2.2 Nosné konstrukce

Veškeré nosné konstrukce zajišťuje stávající nosný systém kontejneru. Nadsazení spalovací části zajišťuje vhodná konfigurace terénu a vypořádání betonovými pražci.

6.2.3 Podlaha

Původní dřevěná nášlapná vrstva podlahy kontejnerů je ponechána. Ve spalovacím prostoru jsou na ní uloženy plynosilikátové tvarovky YTONG tloušťky 80 mm. Nově vzniklá nášlapná vrstva podlahy je vyspárována na sucho pískem. Od hrany spalovacího prostoru ke kótě 330 cm je podlaha výcvikového prostoru pokryta zámkovou betonovou dlažbou tloušťky 50 mm.

6.2.4 Uzávěry otvorů a odvětrání

Ve výcvikovém prostoru jsou zřízeny tři postranní dveřní otvory. Jedná se o železné dveře umístěné v železných zárubních. Rozměry dveří jsou 1900 x 1000 mm. Původní zadní kontejnerová vrata jsou ponechána a byl v nich vyříznut otvor pro hadicové vedení. Rozhraní výcvikového a spalovacího kontejneru je opatřeno dvoukřídlými železnými izolovanými vraty o rozměrech 1830 x 1920 mm.

Šesti metrový kontejner je rozdělen původně vstupními vraty do kontejneru na dvě části – backdraftovou a spalovací. Místo vstupních vrat byla instalována stěna se dvěma nad sebou umístěnými nezávislými otvory o rozměrech 1000 x 940 a 1000 x 1010 mm. Vrata mezi backdraftovým i výcvikovým prostorem jsou izolována minerální vlnou o tloušťce 40 mm. Dvojice otvorů ústících z backdraftového prostoru jsou izolovány minerální vlnou o tloušťce 30 mm.



Obrázek 10: *Otvory v backdraftové části*

Výcvikový prostor je ve směru od spalovacího prostoru na protější straně prvních dveří osazen oknem o rozměrech 930 x 730 mm. Umístěných ve výšce 1210 mm nad podlahou.

Odvětrací systém umožňuje nezávislé ovládání dvou klapek ve stropu kontejneru ze vnitř i z vnějšího prostoru pomocí soustavy táhel. Plechová klapka uzavírá odvětrací otvor o rozměrech 500 x 500 mm.

6.2.5 Speciální zařízení

Ve výcvikovém prostoru se může variabilně umísťovat na navařené železné oka kouřová zástěna. Kouřová zástěna je schopna určit výšku horní horké vrstvy kouře. Je přibližně 600 mm vysoká.



Obrázek 11: *Zástěna v horní části výcvikového prostoru*

7 Návrh měření a zkoušek

7.1 Návrh měření podle návrhu technického měření [8]

Měření v trenažéru je hlavní součástí kalibrační fáze provozu výcvikového zařízení. Měření má v praxi ověřit potřebný tepelný výkon zdroje (množství paliva) a ventilační poměry v trenažéru při scénářích praktického výcviku.

Návrh technického řešení předpokládá následující měření:

- opotřebení konstrukcí a jejich deformaci,
- funkčnost bezpečnostních prvků,
- funkčnost speciálních zařízení,
- popis teplotního pole a zjištění tepelného výkonu referenčního energetického zdroje působícího na volném prostranství,
- popis teplotního pole v trenažéru v závislosti na tepelném výkonu energetického zdroje,
- popis funkcí teplot v trenažéru v závislosti na tepelném výkonu energetického zdroje,
- popis funkce tlaku v závislosti na čase,
- popis chování neutrální roviny v trenažéru,
- analýzu složení zplodin.

Návrh technického řešení neupřesňuje konkrétní umístění měřících přístrojů v trenažéru. Rámcový způsob zpracování návrhu měření byl zvolen z důvodu velké variability uspořádání trenažéru, jehož přesné konstrukční uspořádání nebylo v době vzniku návrhu technického řešení známo. Na základě tohoto rámcového požadavku a po zvážení možností poskytnutých měřících přístrojů ze strany Fakulty bezpečnostního inženýrství, Vysoké školy báňské Ostrava byl zpracován návrh měření a zkoušek v trenažéru HZS Olomouckého kraje.

7.2 Návrh měření v trenažéru HZS Olomouckého kraje

Počátek souřadného systému byl s ohledem na instalaci měřících elementů zvolen na rozhraní výcvikového a spalovacího kontejneru v podélné ose výcvikového kontejneru (střed vrat oddělující oba kontejnery).

7.2.1 Měření teplot

- Délkové kóty - teploty ovzduší ve svislé rovině podélné osy výcvikového prostoru na pozicích -135 cm, 100 cm, 500 cm a 800 cm,
- Výškové kóty:
 - -135 cm ve výškové kótě 80 cm, 170 cm a 220 cm
 - na pozici 100 cm ve výškové kótě 0 cm, 80 cm, 170 cm a 185 cm
 - na pozici 500 cm ve výškové kótě 0 cm, 80 cm a 170 cm
 - na pozici 800 cm ve výškové kótě 170 cm

Všechny termočlánky jsou umístěny do podélné osy výcvikového prostoru.

Termočlánky ve stejných výškových kótách mají stanovit teplotu prostředí na dané délkové kótě, na které hasiči mohou být při měřeném režimu provozu kontejneru přítomni. Umístění termočlánků je vždy situováno tak, aby bylo možno sestavit alespoň velmi hrubý průběh teplot dané délkové kóty.

- Nulová výšková kóta odpovídá rovině podlahy spalovacího prostoru a měla by reflektovat výšku, pod kterou se není hasič schopen při výcviku dostat přilbou tak, aby byl schopný pozorovat dění v trenažéru.
- Kóta 80 cm reflektuje nejvyšší výšku, ve které bude hasič běžně při výcviku působit.
- Kóta 170 cm slouží k měření teploty v horní horké vrstvě plynů a přibližně odpovídá výšce stojící osoby.
- Kóta 185 cm byla umístěna k okraji spalovacího prostoru k ověření výsledků Nielsenova experimentu [14], kdy termočlánky těsně pod stropem vykazovaly nižší teplotu než termočlánky přibližně uprostřed horní vrstvy horkých plynů.
- Termočlánky ve spalovacím prostoru byly určeny k měření teploty plamene resp. teploty vzestupného proudu horkých plynů.

Při volbě délkových kót ve výcvikovém prostoru byly také zvažovány možné přítomnosti osob v různých fázích výcviku v poloze:

- Ležící
- Klečící
- Stojící

- kóta 100 cm – výskyt hasičů při demonstraci rozvoje požáru, působnost instruktora při otevírání a zavírání vrat
- kóta 500/800 cm – přítomnost hasičů provádějících výcvik nebo pozorování
- kóta 800 cm – přítomnost hasičů provádějících výcvik nebo pozorování, přibližná poloha druhých únikových dveří.

7.2.2 Měření hustot toku tepla

- na pozici 100 cm ve výšce + 60 cm a + 110 cm (nad kótou 0)
- na pozici 500 cm ve výšce + 60 cm (nad kótou 0)
- na pozici 270 cm ve výšce + 60 cm (nad kótou 0)

Radiometry na pozicích 100 cm a 500 cm směřují ke snímání tepelného toku ze směru spalovacího prostoru. Radiometr na pozici 270 cm je nasměrován na snímání tepelného toku horní horké vrstvy plynů. Radiometry jsou umístěny v podélné ose výcvikového prostoru.

Radiometry na pozici 100 cm byly umístěny s ohledem na zachycení teplotního toku z přední části hranice paliva a z části nad palivem, respektive z horizontálně snímaného tepelného toku horní horké vrstvy plynů.

Radiometry ve výškových kótách 60 cm měří hodnotu tepelného toku dopadajícího na hasiče při výcviku v klečící poloze. Radiometr ve výškové kótě 100 cm měří tepelný tok dopadající na stojícího hasiče při výcviku. Radiometr v pozici 270 cm snímá kolmo dopadající tepelný tok (jednu z příčin flashoveru).

7.2.3 Koncentrace vybraných zplodin hoření

Vzorkovacím zařízením budou stanoveny koncentrace CO , CO_2 a O_2 . Vzorkovací sondy jsou umístěny v kótách 100 cm a 600 cm. Budou realizovány pomocí měděné trubky o průměru přibližně 1 cm. Vzorkovací sondy povedou ze stropu kontejneru přibližně 10 cm dovnitř tak, aby vzorkovali horní horkou vrstvu plynů. Umístění vzorkovacích sond bude v podélné ose výcvikové části v délkových kótách termočlánků a to především s ohledem

na jednoduchou instalaci (minimalizace instalačních otvorů v kontejneru) a potvrzení zředování zplodin hoření v horní horké vrstvě plynů mezi kótami.

7.2.4 Vizuelní záznam

Pořízení vizuelního záznamu bude realizováno digitální videokamerou umístěnou před vrata vstupního kontejneru tak, aby nedošlo k poškození přístroje.

7.2.5 Vývoj neutrální roviny

Vývoj neutrální roviny bude zaznamenáván pomocí videokamery a dřevěného pravítka umístěného v kótě 900 cm v podélné ose výcvikového prostoru.

7.2.6 Termovizní záznam

Termovizní záznam zobrazoval vnitřní prostor trenažéru v infračerveném spektru a stanovoval přibližné teploty povrchů konstrukcí trenažéru. V přípravné fázi měření nebyla známa odolnost termokamery a přenosového zařízení vůči podmínkám v trenažéru a další technické podrobnosti ovlivňující úspěšné použití zařízení. Z těchto důvodů bude termokamera umístěna do kontejneru až příslušníky HZS Olomouckého kraje při samotném měření.

7.3 Konečná konfigurace přístrojů a zařízení při měření

Veškeré termočlánky ve výcvikovém prostoru byly posunuty z umístění v podélné ose výcvikového prostoru k levé stěně z pohledu ze směru výcvikového prostoru do prostoru spalovacího, tzn. z kóty 0 cm ve směru y do kóty - 80 cm. Ke změně pozic došlo ve snaze o co nejmenší poškození trenažéru navrtáním děr a malou délkou termočlánekových drátů. Pro zkrat a výšku paliva byl vypuštěn termočlánek na délkové kótě 0 cm a výškové kótě 80 cm.

IČ kamera byla umístěna v délkové kótě 1000 cm, výškové kótě - 40 cm, v y kótě (kolmé na podélnou osu) -65 cm od podélné osy výcvikového kontejneru.

Konečná konfigurace měřících přístrojů (viz. PŘÍLOHA I).

7.4 Přehled měřících přístrojů a zařízení použitých při měření

- Při měření teplot v kontejneru byly použity plášťové termočlánky typu K 8 kusů + kompenzační vedení,
- data logger HH309 OMEGA – 3 kusy,
- vzorkovací zařízení SICK MAIHAK S710, s infračervenými analyzátory oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a elektrochemickým analyzátozem koncentrace kyslíku,
- membránové vodou chlazené radiometry (vyrobena podle návrhu Ing. Bohdana Filipiho, PhD) se stojany – 3 kusy,
- záznamové zařízení pro radiometry MONARCH DATACHART 2000,
- termokamera BULLARD + NOTEBOOK,
- digitální videokamera SONY DCR TRV 40,
- dřevěné pravítko o délce 2 m.



Obrázek 12: Měřící stanoviště

8 Provedení praktické zkoušky

Datum praktické zkoušky bylo stanoveno na termín 15. a 16. března 2007. Každá konfigurace otvorů a umístění paliva byla ověřována dvěmi shodnými měřeními zkouškami. Mimo to se každý den před sérií zkoušek konala neměřená zkouška, která měla za úkol:

- působením tepelného zdroje zbavit trenažér vlhkosti,
- ověřit, že konfigurace paliva a ventilačních otvorů umožní navodit jevy, jejichž měření je cílem jednotlivých sérií zkoušek,
- vizuální pozorování a popis navozovaných jevů,
- v případě druhé série testů také vyloučit možnost poškození měřících přístrojů tepelným tokem,
- vystavit přítomné hasiče působení tepla a zjistit subjektivní pocity.

15. března po skončení série měření se konala měřená zkouška, která pomocí otvírání vrat mezi spalovacím a výcvikovým prostorem demonstrovat šíření a odhořívání nahromaděných produktů pyrolýzy.

8.1 Příprava zkoušky

Plášť kontejneru byl navrtán v kótách umístění termočlánků ve výcvikovém prostoru. Ve spalovacím prostoru sloužil ke zpuštění termočlánků ventilační otvor ve stropu, který byl překryt 12 cm širokou deskou z čedičové vlny. Izolační deskou byly vedeny termočlánky. Veškeré termočlánky byly zapojeny do data loggerů.

Dle původního návrhu byly instalovány na dva stojany tři radiometry. V druhém dni zkoušek byl po úvodní neměřené ověřovací zkoušce přesunut horní radiometr ze stojanu na kótě 100 cm na stojan na kótě 270 cm a směřován kolmo na strop tak, aby dle návrhu snímal tepelný tok z horní horké vrstvy plynů. Radiometry byly napojeny na chladicí systém a záznamové zařízení.

Pro odběrní místa vzorkovacího zařízení byly navrtány otvory ve stropu pozorovací části. S ohledem na předpokládané vysoké teploty byly v otvorech umístěny měděné trubičky a teprve vně kontejneru byly k těmto trubičkám připojeny silikonové hadice vzorkovacího zařízení. Na vnějším plášti kontejneru udržovaly správnou orientaci měděných trubiček

dřevěné cívky na kabeláž. Cívka u přední sondy se vlivem působení tepla z trenažéru několikrát iniciovala a později byla nahrazena minerální vlnou.

V 1. sérii zkoušek neměřil termočlánek na pozici 100;170, což vyloučilo možnost ověření Nielsenova experimentu [14]. Ve třetí zkoušce 1. série selhal zápis dat do záznamového zařízení obsluhujícího termočlánek na délkové pozici 500 cm a termočlánek na kótě 800;170 cm.

Ve druhé sérii zkoušek (zkouška 4 a 5) fungovaly všechny termočlánek s výjimkou pozice 500;170 cm, na níž udává termočlánek nevěrohodné údaje.

Veškeré poruchy termočláneků jsou pravděpodobně způsobeny ztrátou kontaktu na konektorech nebo vadným termočlánekovým drátem.

8.2 Bezpečnostní opatření při zkouškách

K jištění veškerých pokusů byly použity CAS 32/8000/800 S3R T815, 1B, rozdělovač, 1C a kombinovaná proudnice AWG. Cisternová automobilová stříkačka byla vždy umístěna tak, aby hadicové vedení umožňovalo jistit všechny činnosti v trenažéru. Dýchací techniku zapůjčil HZS Olomouckého kraje, územní odbor Prostějov. K dispozici byl dostatečný počet IDP RACAL 3000 nebo RACAL 4000 s kompozitovými lahvemi.



Obrázek 13: Při zkouškách byla přítomna CAS 32/8000/800 S3R

8.3 Konfigurace ventilačních otvorů a paliva

1. série zkoušek se vyznačovala umístěním paliva pouze na podlahu spalovacího prostoru a po celý průběh zkoušek stejnou konfigurací ventilačních otvorů (viz tabulka 1 a tabulka 4)

tabulka 1: Konfigurace ventilačních otvorů při první sérii zkoušek

Otvor	Stav
Klapky nouzového větrání	Zavřeny
Postranní dveře	Zavřeny
Vrata mezi SP a VP	Otevřeny
Vrata mezi BP a SP	Zavřeny
Vrata VP	Otevřeny

2. série zkoušek se vyznačovala umístěním paliva mimo podlahy i na stěny, resp. strop spalovacího prostoru. Konfigurace ventilačních prostorů byla volena tak, aby se ve 3. fázi požáru omezil hmotnostní tok vzduchu do prostoru trenážeru. Tabulka 2 udává finální konfiguraci otvorů.

tabulka 2: Konfigurace ventilačních otvorů při druhé sérii zkoušek

Otvor	Stav
Klapky nouzového větrání	Zavřeny
Postranní dveře	Pootevřeny
Vrata mezi SP a VP	Otevřeny
Vrata mezi BP a SP	Zavřeny
Vrata VP	Zavřeny

Aktuální konfigurace ventilačních otvorů byla při demonstračním testu vedena s cílem maximálního vývinu žíhavých plamenů (viz tabulka 3).

tabulka 3: *Konfigurace ventilačních otvorů při demonstrační zkoušce*

Otvor	Stav
Klapky nouzového větrání	Otevírány k odvětrání VP
Postranní dveře	Otevírány k odvětrání VP
Vrata mezi SP a VP	Po nahromadění produktů pyrolýzy ve VP otevírány
Vrata mezi BP a SP	Zavřeny
Vrata VP	Otevřeny

tabulka 4: *Konfigurace paliva ve spalovacím prostoru*

Číslo zkoušky	Množství paliva [kg]	Obložení zdí a stropu
1.	130	Ne
2.	130	Ne
3.	130	Ano
4.	150	Ano
5.	150	Ano

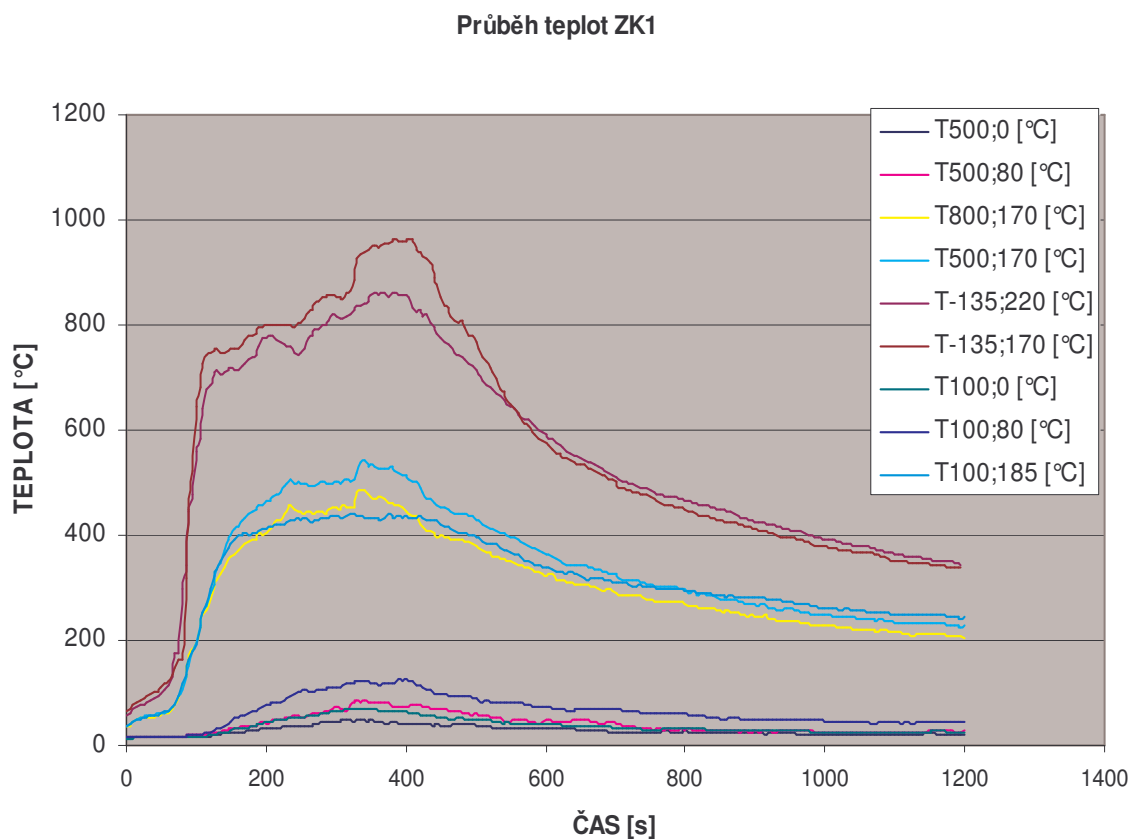
8.4 Iniciace paliva

Palivo bylo iniciováno pomocí papíru vsunutého pod dřevěné třísky. Současně byly zapáleny obě hranice dřeva. K akceleraci hoření nebyla použita žádná hořlavá kapalina, ač se dle zahraniční literatury často při podobných testech používá [25].

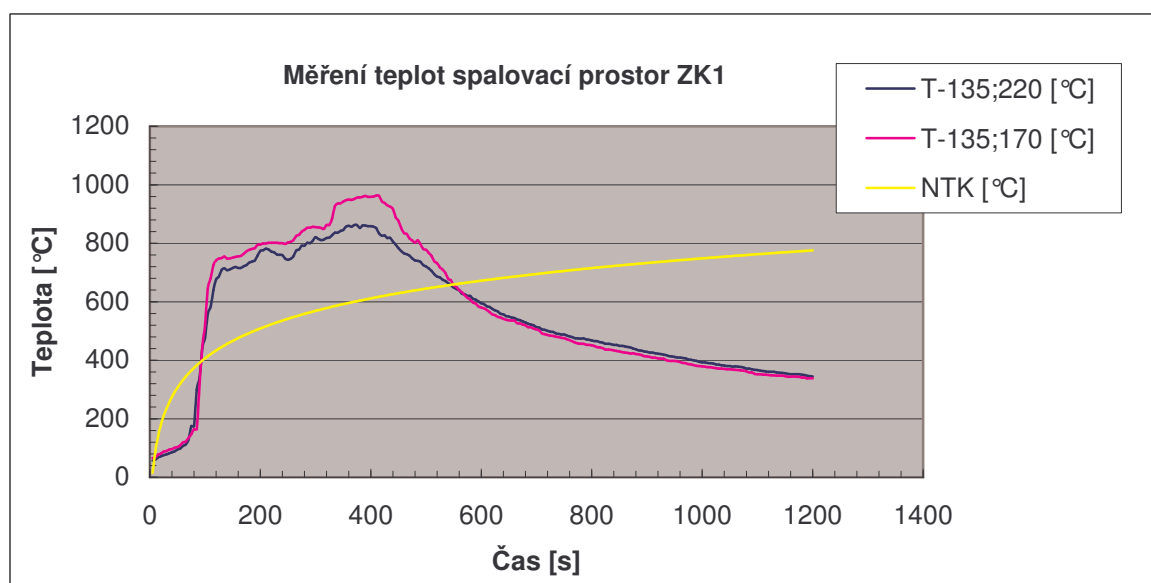
1. Zkouška

Začátek zkoušky: 15.3.2007, 15:04:24

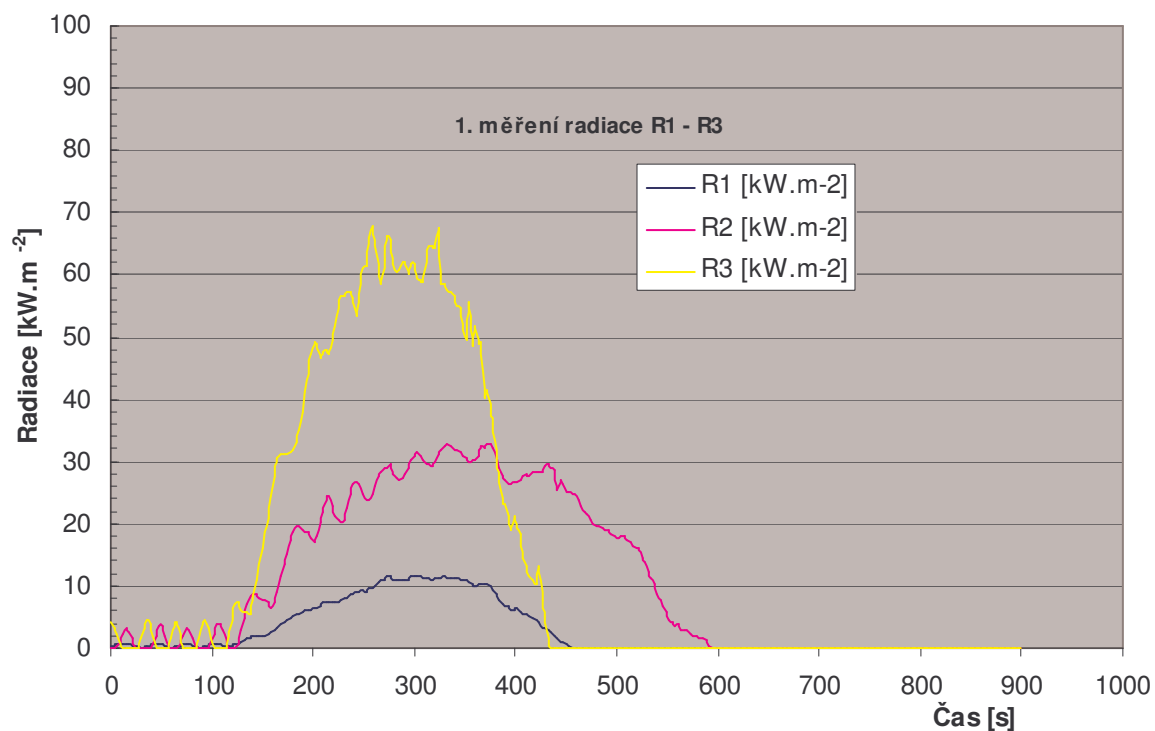
Průběhy teplot, tepelných toků a koncentrací jsou patrné z obr.



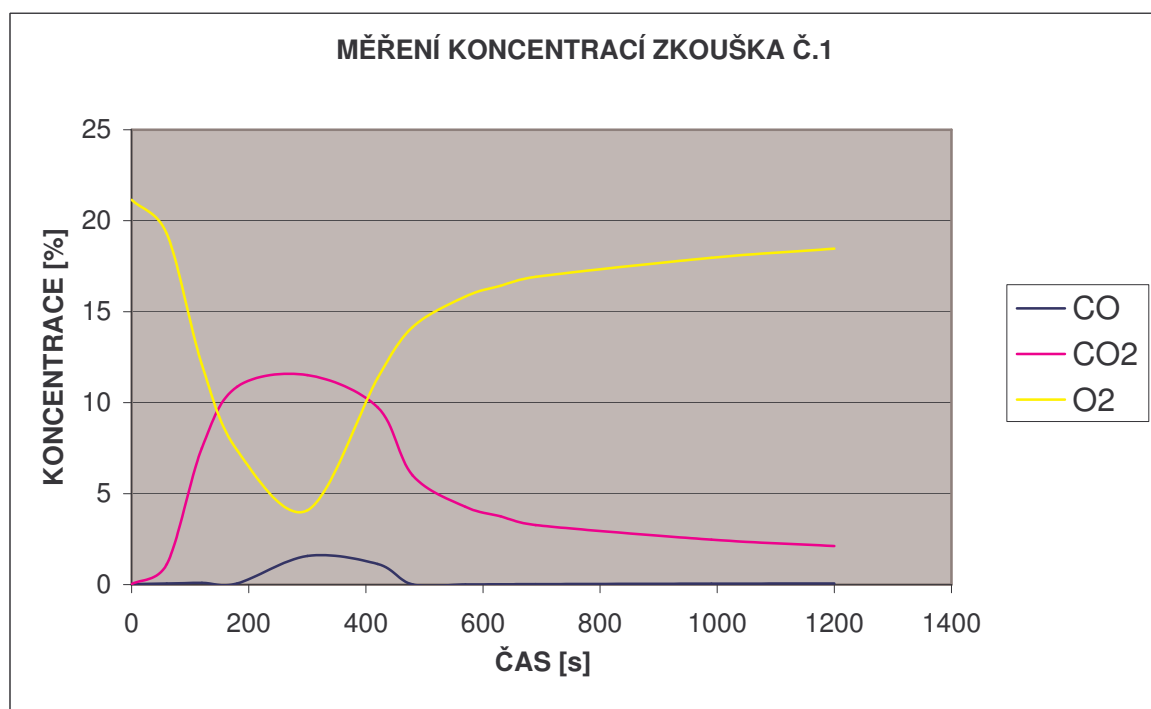
Obrázek 14: Průběh teplot při zkoušce 1



Obrázek 15: Průběh teplot ve spalovacím prostoru při zkoušce 1



Obrázek 16: Záznamy z radiometrů při zkoušce 1 (R1 leží na kótě 500;60 cm, R2 na 100;60 cm a R3 100;100cm)

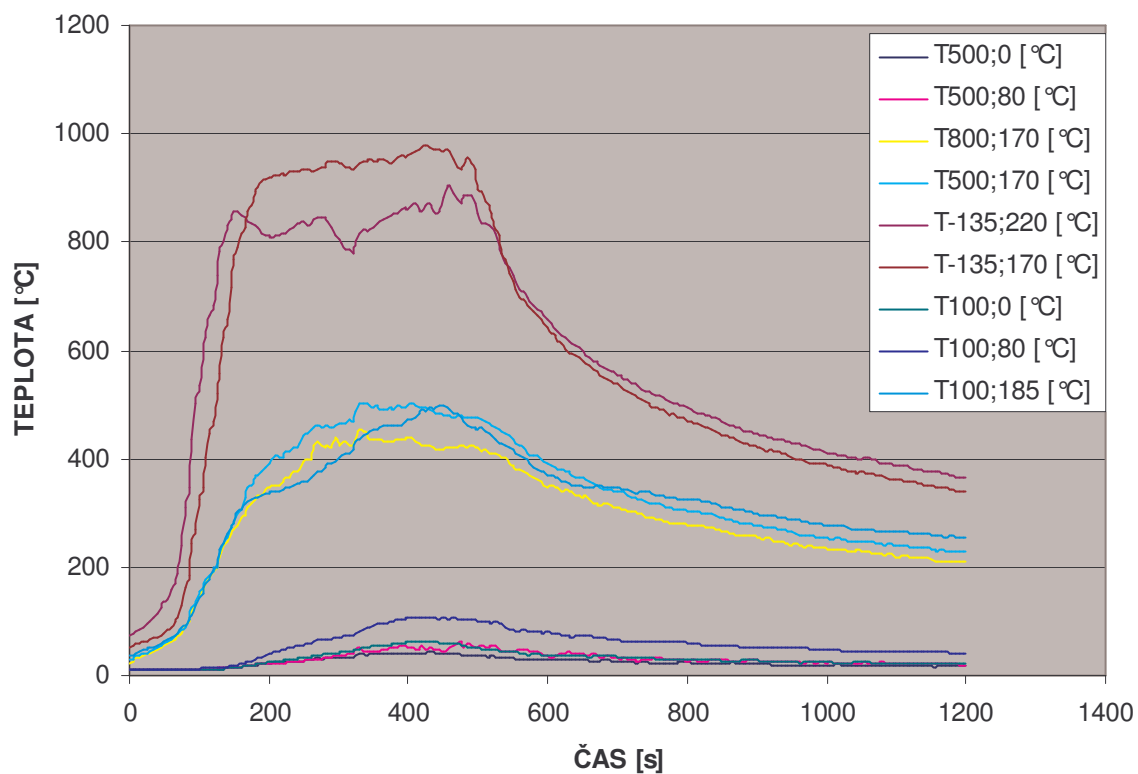


Obrázek 17: Záznam koncentrací při zkoušce 1

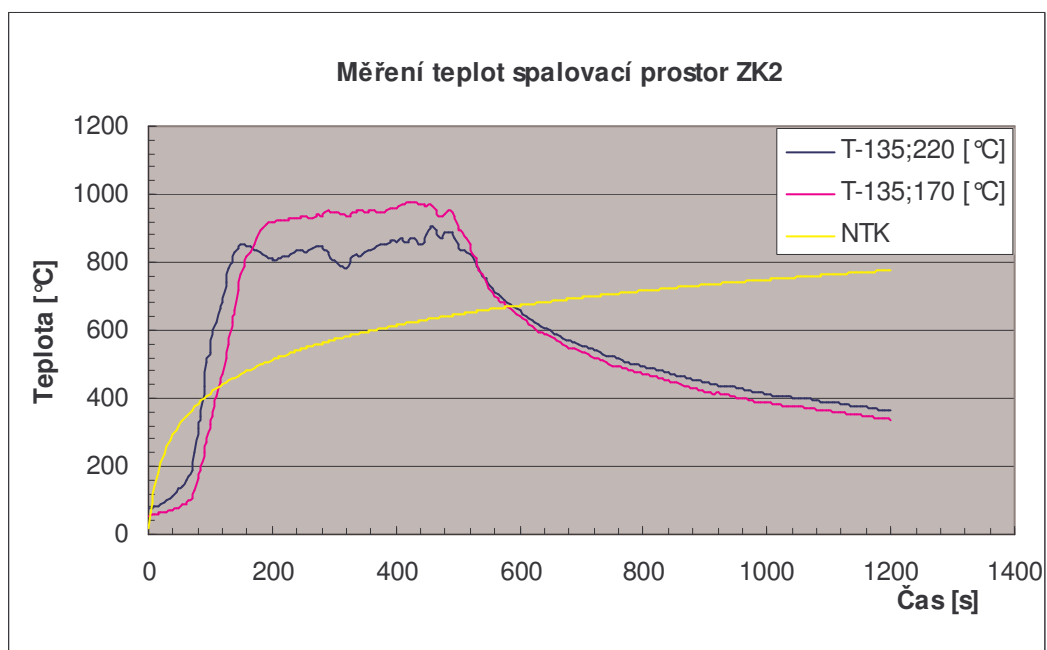
2. Zkouška

Začátek zkoušky: 15.3.2007 16:48:25

Průběh teplot ZK2

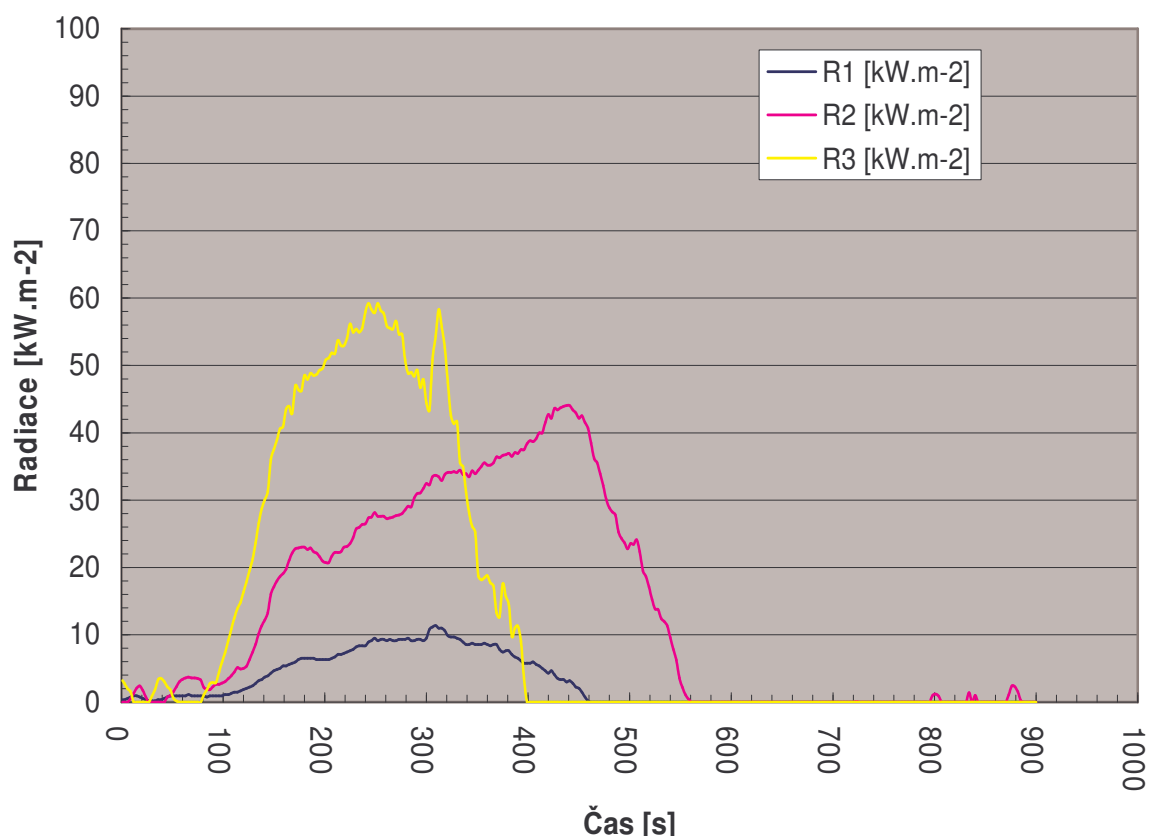


Obrázek 18: Průběh teplot při zkoušce 2

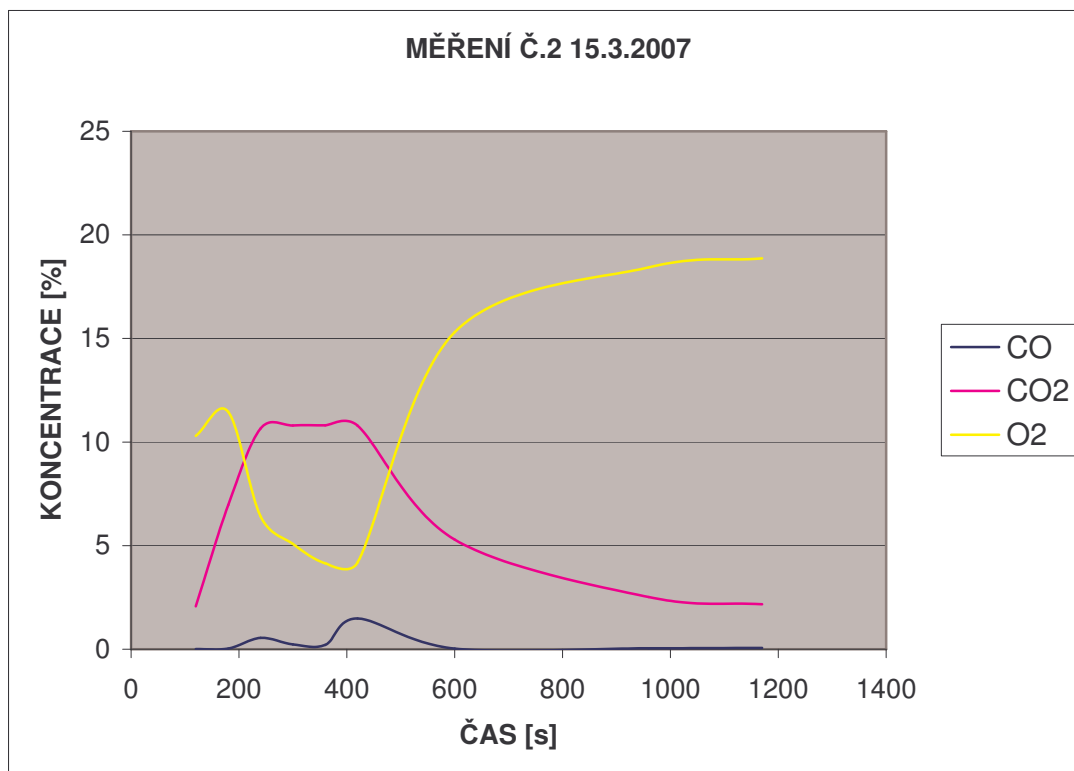


Obrázek 19: Průběh teplot ve spalovacím prostoru při zkoušce 2

2. měření radiace R1 - R3



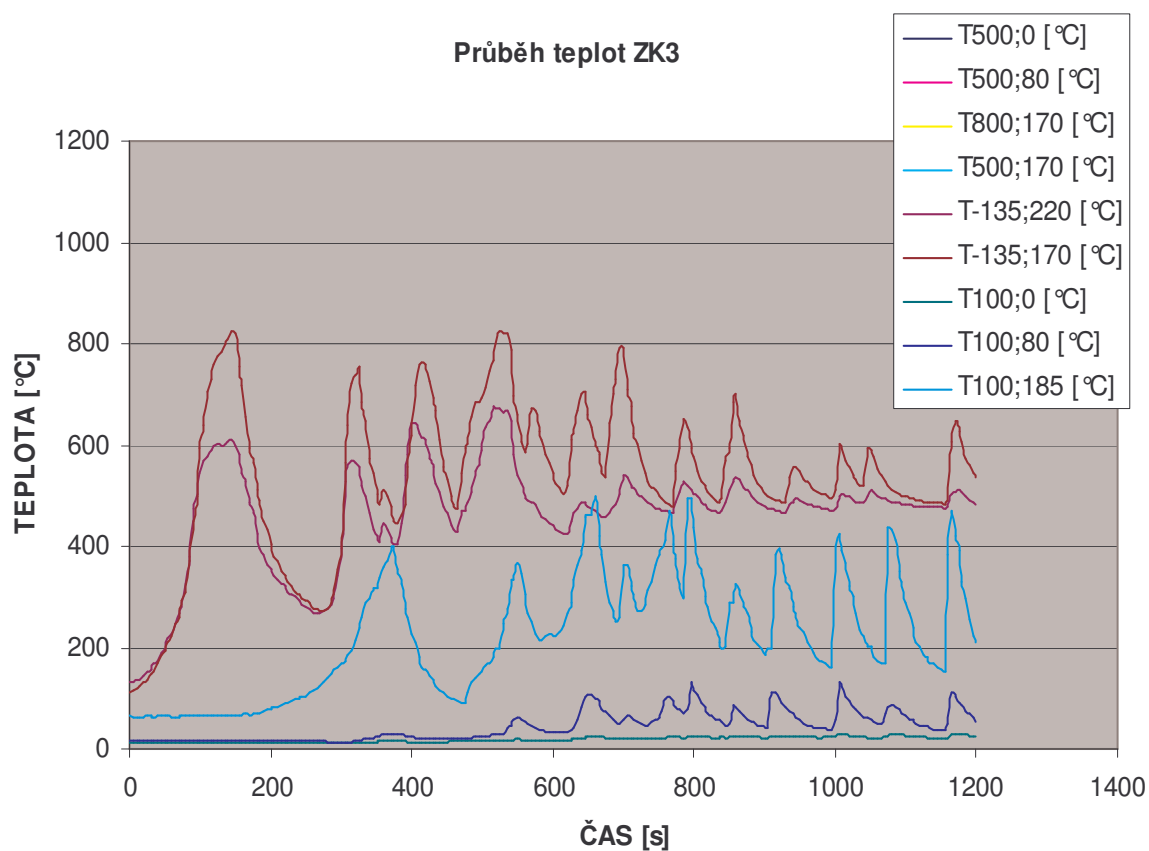
Obrázek 20: Záznamy z radiometrů při zkoušce 2 (R1 leží na kótě 500;60 cm, R2 na 100;60 cm a R3 100;100cm)



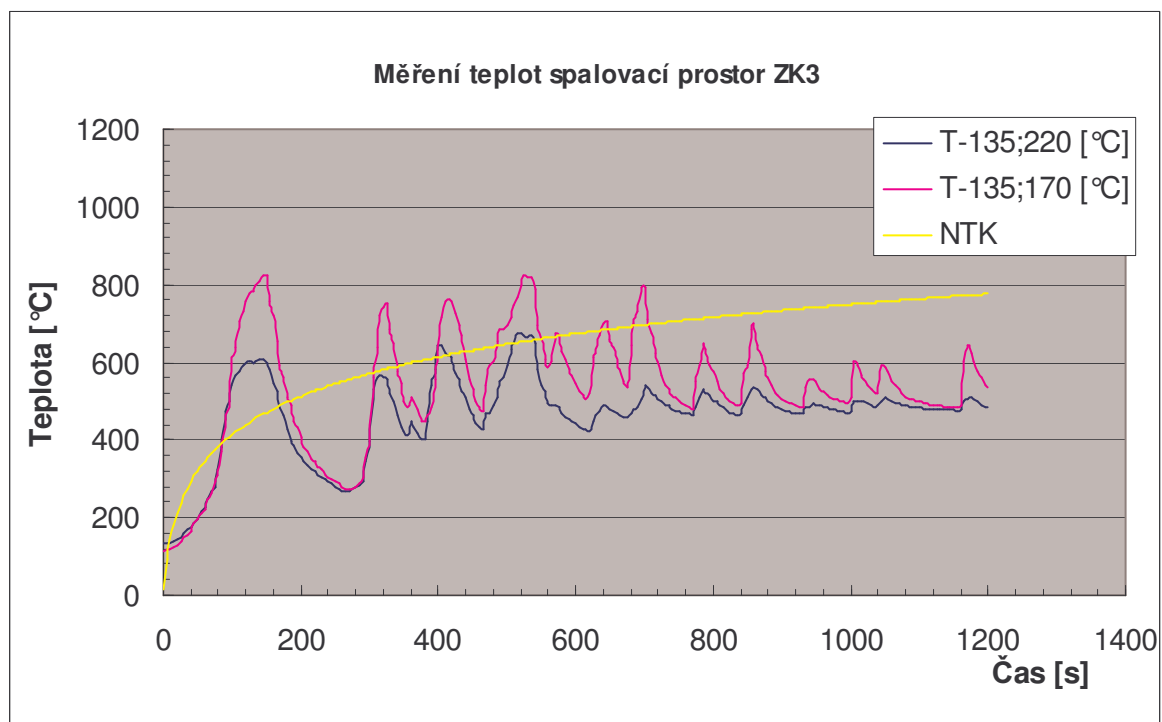
Obrázek 21: Záznam koncentrací při zkoušce 2

3. zkouška

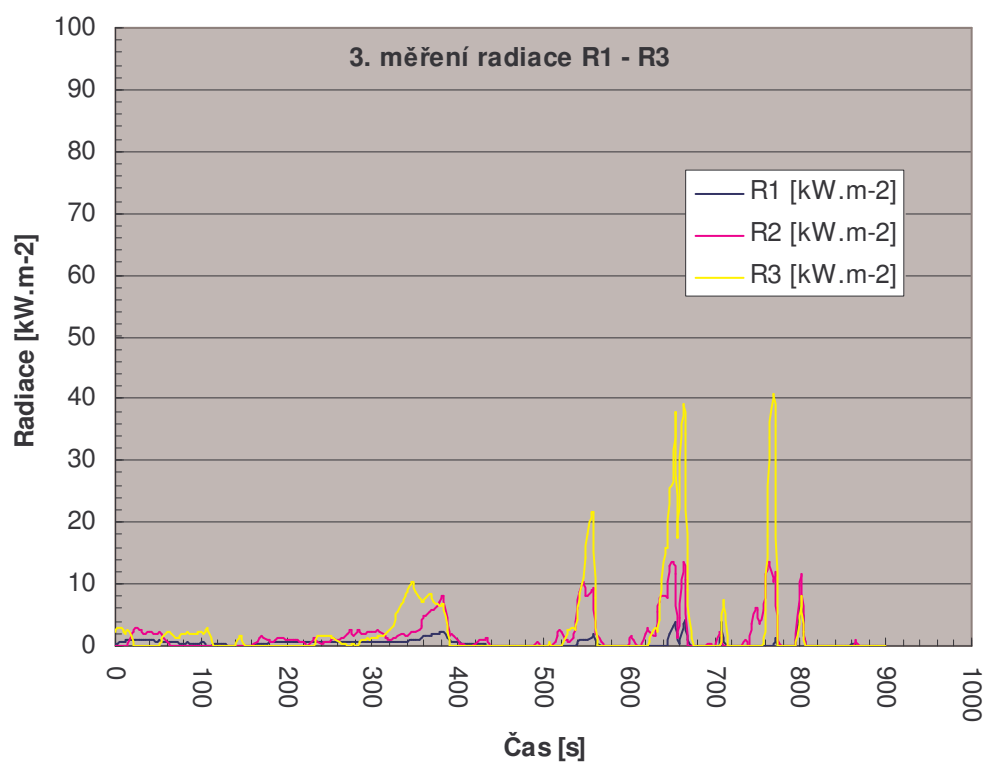
Začátek zkoušky: 15.3.2007 17:51:56



Obrázek 22: Průběh teplot při zkoušce 3



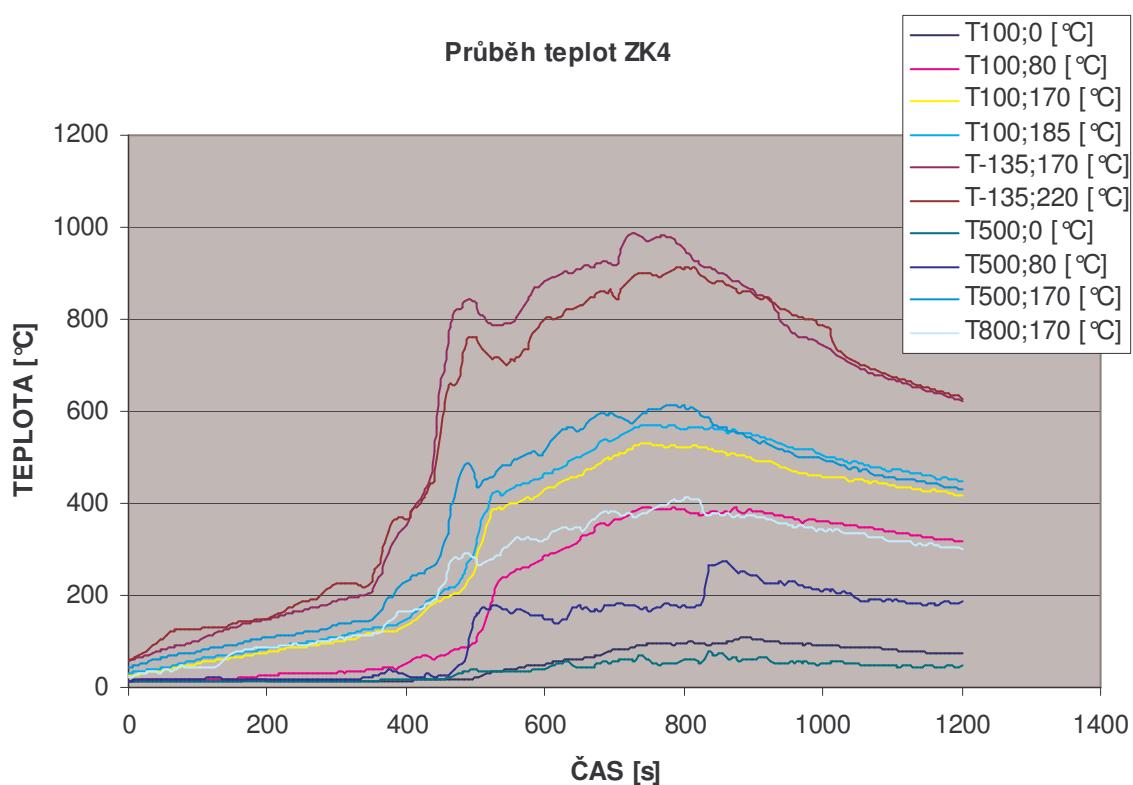
Obrázek 23: Průběh teplot ve spalovacím prostoru při zkoušce 3



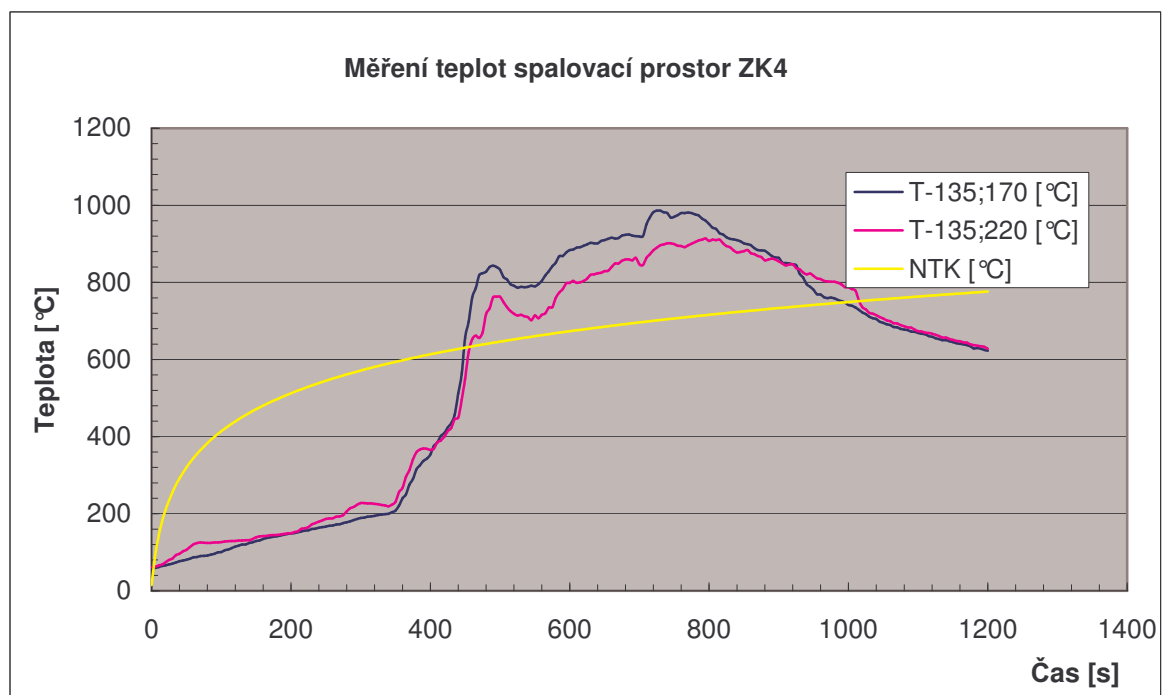
Obrázek 24: Záznamy z radiometrů při zkoušce 3 (R1 leží na kótě 500;60 cm, R2 na 100;60 cm a R3 100;100cm)

4.zkouška

Začátek zkoušky: 16.3.2007 12:06:19

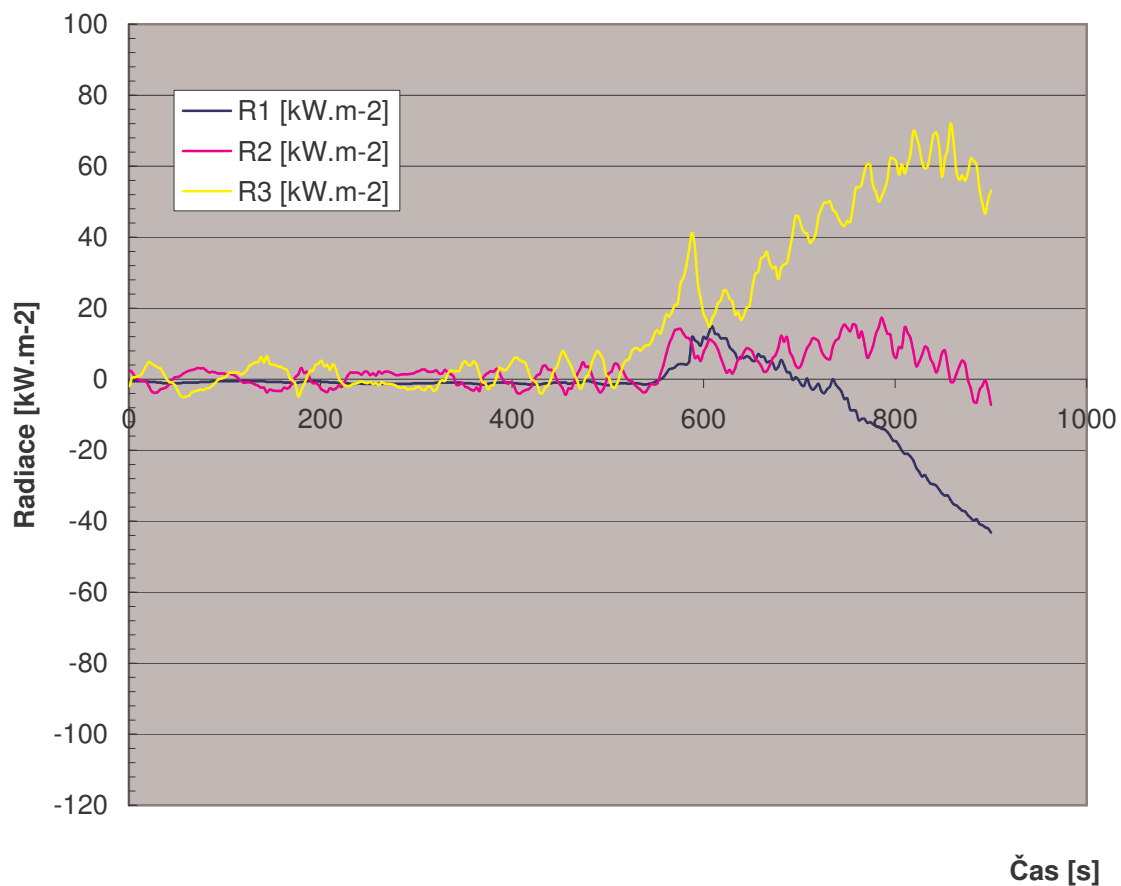


Obrázek 25: Průběh teplot při zkoušce 4

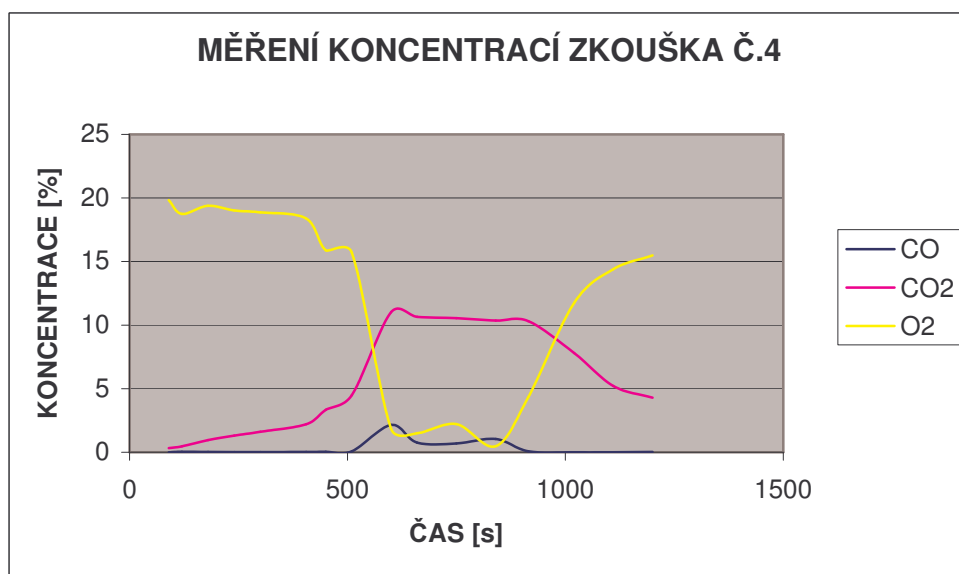


Obrázek 26: Průběh teplot ve spalovacím prostoru při zkoušce 4

4. měření radiace R1 - R3



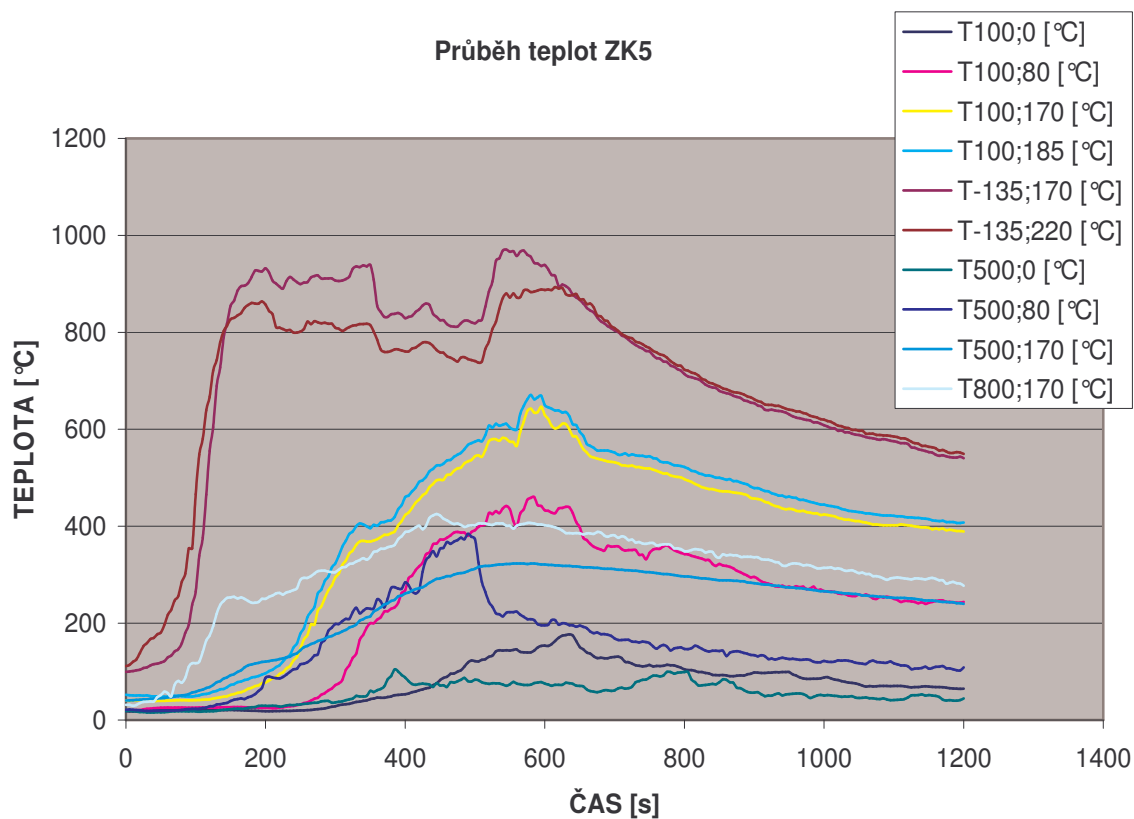
Obrázek 27: Záznamy z radiometrů při zkoušce 4 (R3 leží na kótě 270;60 cm, R2 na 100;60 cm a R1 na 500;60 cm)



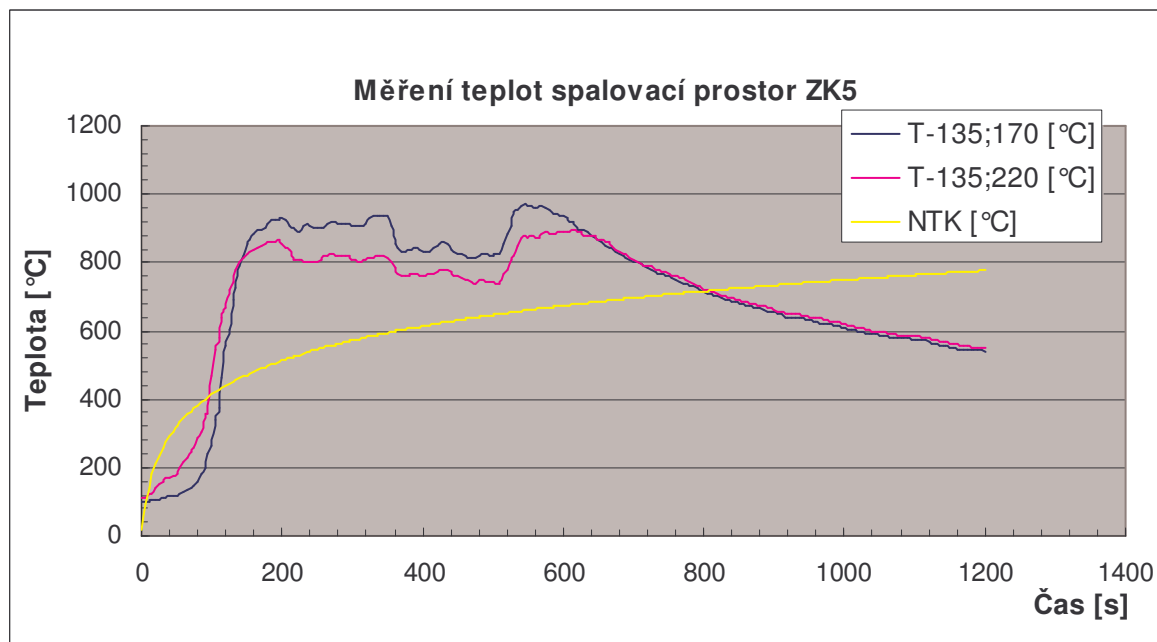
Obrázek 28: Záznam koncentrací při zkoušce 4

5. Zkouška

Začátek zkoušky: 16.3.2007 13:34:43

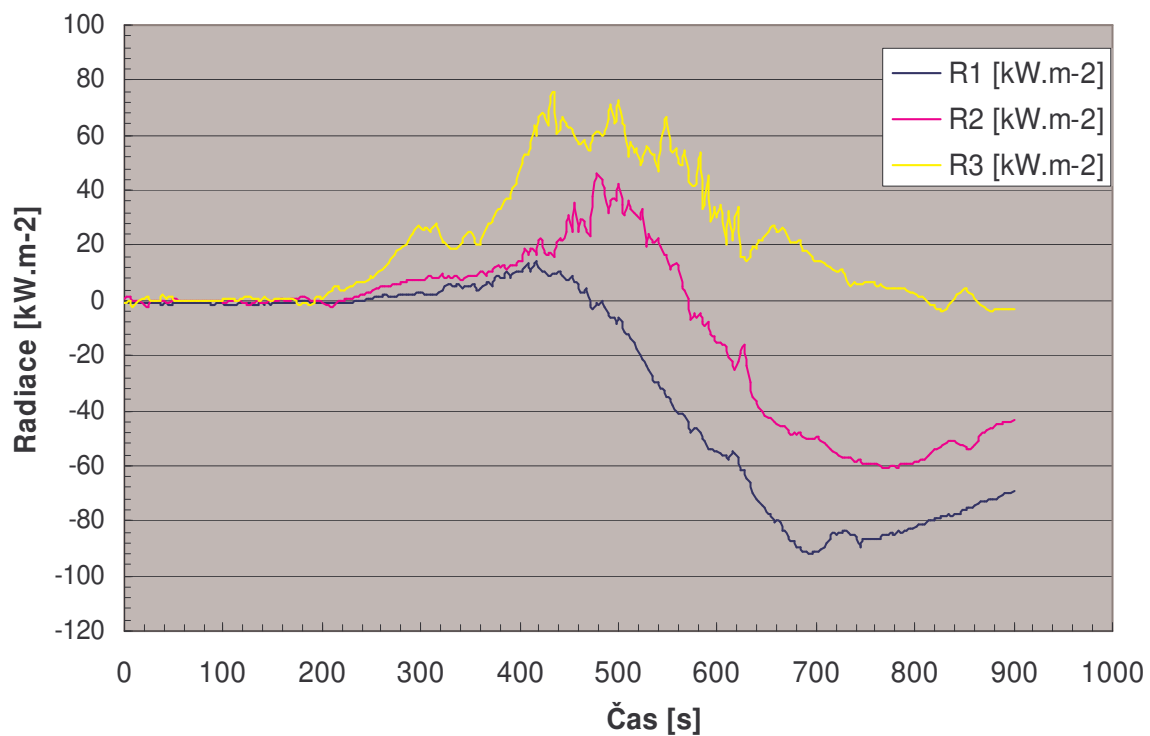


Obrázek 29: Průběh teplot při zkoušce 5

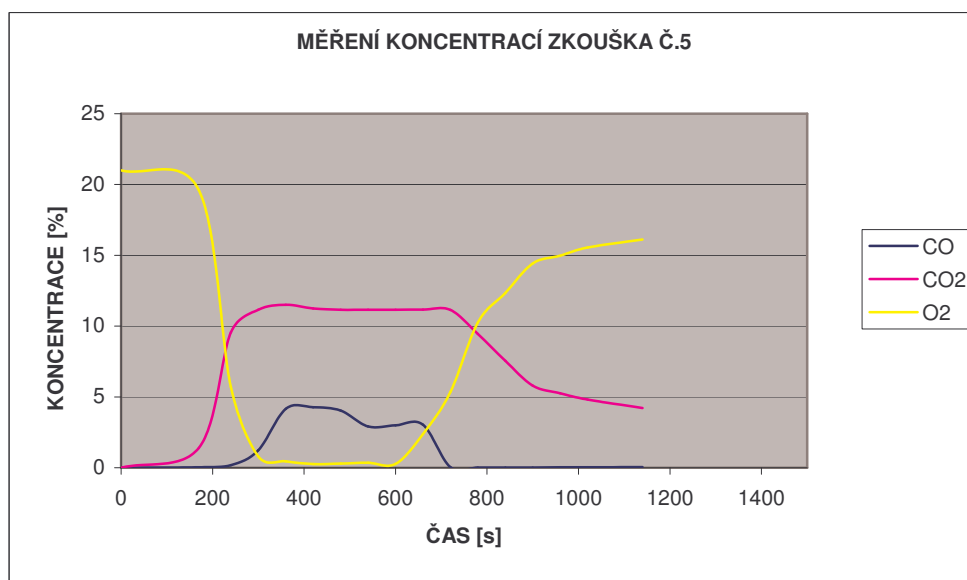


Obrázek 30: Průběh teplot ve spalovacím prostoru při zkoušce 5

5. měření radiace R1 - R3



Obrázek 31: Záznamy z radiometrů při zkoušce 5 (R1 leží na kótě 500;60 cm, R2 na 100;60 cm a R3 270;60cm)



Obrázek 32: Záznam koncentrací při zkoušce 5

9 Předpokládané parametry požáru v trenažéru

9.1 Předběžný odhad výkonu zařízení potřebného pro flashover

Jedná se o hypotézu, která bude vyhodnocena na základě výsledků zkoušek. Na základě normové teplotní křivky, rychlosti rozvoje požáru a odhadu času potřebného k dosažení inflexního bodu křivky skutečného požáru jsme schopni přibližně odhadnout rychlost uvolňování tepla. Tato metoda je navržena diplomantem a nezohledňuje parametry prostoru, ventilační poměry a množství paliva. Vychází pouze z podobnosti předpokládané podobnosti rozvoje bytového požáru, požáru v trenažéru a teplotní normové křivky.

Na základě literatury [16] jsme určili 610 °C jako potřebnou teplotu horní vrstvy horkých plynů pro vznik flashoveru. Z teplotní normové křivky si určíme čas, při kterém inkriminovaná teplota nastává.

$$T = 345 \log(8t + 1) + T_0$$
$$t = \frac{10^{\left(\frac{T-T_0}{345}\right)} - 1}{8} \quad [1]$$
$$t = \frac{10^{\left(\frac{595}{345}\right)} - 1}{8}$$
$$t = 5,6 \text{ min} = 340 \text{ s}$$

T... teplota (°C),

t.... čas (min),

T₀... počáteční teplota (°C)

$$Q^* = \alpha t^2 = 0.012 * 340^2 = 1400 \text{ kW} \quad [4]$$

Q*rychlost uvolňování tepla potřebná pro flashover (kW),

αrůstová konstanta kW.s⁻²,

Rychlost uvolňování tepla považujeme za dostatečnou pro vznik flashoveru v prostoru.

Vyhodnocení metody na základě výsledků zkoušek

Metoda měla sloužit k rychlému odhadu přibližného výkonu potřebného pro vznik flashoveru. S ohledem na velmi odlišný průběh naměřených teplotních křivek od normové teplotní křivky je nutno konstatovat, že metodou se nedá jakkoli odhadovat výkon požáru.

9.2 Odhad na základě výhřevnosti paliva

Za hodnotu výhřevnosti jsem považoval 13 MJ/kg. Dále jsem vycházel z předpokladu, že celkově shoří 80% paliva z toho ve fázi plného rozvoje 70% z množství celkového paliva. Pro hmotnost 130 kg připadá na hoření v plné fázi rozvoje 72 kg dřevní hmoty. Podle teplotní křivky ze spalovacího prostoru jsme pokládali za fázi plného rozvoje 350 s. Výslednou rychlost hmotnostního úbytku 0,20 kg/s jsme dosadili do vztahu:

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{m}_a \Delta H_c = 0,2 \cdot 13 = 2,6 \text{ MW} \quad [4]$$

Výsledná rychlost uvolňování tepla byla 2,6 MW.

Pro zkoušku 5 (viz tabulka 4) jsme za shořelé množství paliva ve fázi plného rozvoje, který trval 550 s, pokládali 84 kg. Výsledná rychlost uvolňování tepla byla přibližně 2,08 MW

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{m}_a \Delta H_c = 0,16 \cdot 13 = 2,08 \text{ MW}$$

$\dot{m}_a$... rychlost hmotnostního úbytku paliva (kg / s) ,

ΔH_c ... výhřevnost látky (MJ/kg),

$\dot{Q}_{\max}$... rychlost uvolňování tepla ve fázi plného rozvoje

9.3 Výpočet neutrální roviny

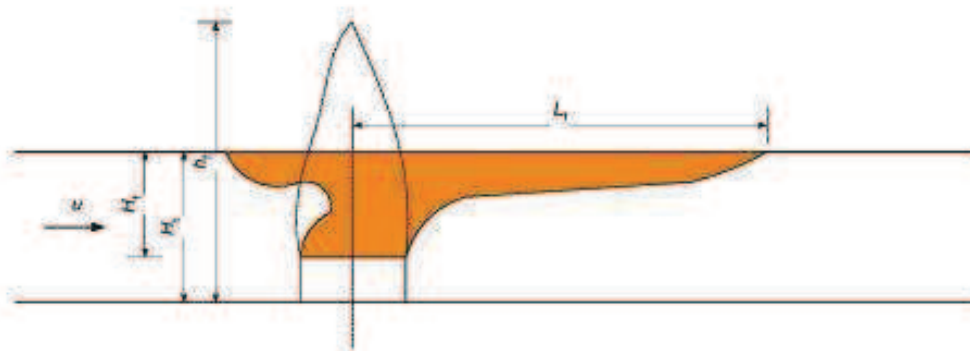
$$\rho_g = \frac{353}{T} = \frac{353}{600 + 273} = 0,404 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_{vz} = \frac{353}{T} = \frac{353}{15 + 273} = 1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$h_1 = \frac{H_0}{1 + (\rho_{vz} / \rho_g)^{1/3}} = \frac{2,35}{1 + (1,22 / 0,404)^{1/3}} = 0,96 \text{ m}$$

Výpočtem byla stanovena výška neutrální roviny na přibližně 1 m nad podlahou pozorovací části kontejneru. Přibližně stejná výška neutrální roviny byla pozorována v průběhu 4. a 5. pokusu. Výsledek výpočtu rovněž potvrzuje vrstva usazených sazí na stěnách trenažéru po ukončení pokusů.

9.4 Výška plamenů a tepelné sálání



Obrázek 33: Odklon plamene při stropu

Vztah pro výšku plamenů v uzavřeném prostoru udává střední výšku plamenů nad ohniskem požáru po převažující část doby hoření. Quintiere [17] ve své publikaci tento vztah udává za korelaci pokusů s kapalným palivem (pool fire). Vztah nezohledňuje nehomogenost tuhého paliva (palet, třísek). V podmínkách spalování dřevní hmoty se dle Quintierových výpočtů a experimentů udává spíše výšku oblasti hoření než polohu špiček plamenů nad ohniskem.

Výška plamenů v závislosti na rychlosti vývinu tepla a poloměru požáru:

$$h_f = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D$$

$$h_f = 0,235 \cdot 2595^{2/5} - 1,02 \cdot 2,5$$

$$h_f = 5,0161 - 2,2236 = 2,90m$$

[17,29]

$$S_{zdroje} = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{zdroje}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{\pi}} \approx 2,5m$$

Vztah pro odklon plamene při stropu místnosti:

$$1 = \frac{L_f}{h_f - H_f} \quad [17]$$

$$L_f = 1(h_f - H_f) = 1(2,90 - 1) = 1,90m$$

h_f výška plamenů (m),

$\dot{Q}$ rychlost uvolňování tepla (kW),

D.....poloměr požáru (m),

S_{zdroje} ...plocha požáru (m²),

L_fodklon plamene (m)

9.5 Orientační stanovení tepelného toku [26]

Pro orientační stanovení hodnoty sálavé složky tepla předávaného z prostoru vyplněného svítivým plamenem a horkými zplodinami hoření do okolí platí v bezprostředním okolí požáru, tj. do vzdálenosti L_f :

$$q_{pl} = \varphi \cdot \varepsilon_{pl} \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{pl}^4 - T_0^4) = 1,0 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1365^4 - 288^4) = 4,01 \cdot 10^{-8} \cdot 4,70 \cdot 10^{12} = 117870 W \cdot m^{-2} \approx 120 kW \cdot m^{-2}$$

q_{pl} ...tepelný tok z plamene (kW.m⁻²)

φ součinitel ozáření (-)

ε_{pl} ...emisní součinitel plamene (-)

ε_s emisní součinitel stěny (-)

σ Stefan-Boltzmanova konstanta (W.m⁻².K⁻⁴)

T_{pl}teplota plamene (K)

T_0Teplota okolního prostředí (K)

Pro stanovení tepelného sálání zplodin hoření platí:

$$q_{zp} = \varphi \cdot \varepsilon_{zp} \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{zp}^4 - T_0^4) = 1,0 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (873^4 - 293^4) = 19509 W \cdot m^{-2} \approx 20 kW \cdot m^{-2}$$

Pro celkový radiační tok platí:

$$q_r = q_{pl} + q_{zp.} = 120 + 20 \approx 140 \text{ kW.m}^{-2}$$

ε_{zp} ...emisní součinitel zplodin hoření

Teplo sdílené prouděním:

$$q_k = \alpha_c (T_g - T_0) = 35(610 - 20) = 20650 \text{ W.m}^{-2}$$

Celkový tepelný tok obsahuje konvekční a radiační složku

$$q = q_r + q_k = 140 + 20,65 \approx 160 \text{ kW.m}^{-2}$$

q ...tepelný tok (kW.m^{-2})

q_r ...radiační tepelný tok (kW.m^{-2})

q_k ...konvektivní tepelný tok (kW.m^{-2})

α_c ...součinitel přestupu tepla ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

T_g ...teplota plynů horní horké vrstvy (K)

T_0 ...teplota okolního vzduchu (K)

9.6 Teplota vzestupného proudu horkého kouře

$$T_{p(\text{centerline})} - T_a = 9,1 \left(\frac{T_a}{g} c_p^2 \rho_a^2 \right)^{1/3} Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}$$

$$T_{p(\text{centerline})} - T_a = 9,1 \cdot \left(\frac{15}{9,81} \cdot 1,00^2 \cdot 1,23^2 \right)^{1/3} \cdot 2595^{2/3} (1,4 + 0,65)^{-5/3} \quad [5]$$

$$T_{p(\text{centerline})} = 1092,64^\circ \text{C}$$

$T_{p(\text{centerline})}$...teplota plamenů ve středu požáru ($^\circ\text{C}$)

T_a teplota okolního vzduchu ($^\circ\text{C}$)

g tíhové zrychlení (m.s^{-2})

c_p měrné teplo ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

ρ_a hustota okolního vzduchu (kg.m^{-3})

Q_c konvekční složka výkonu tepelného zdroje (kW)

z vzdálenost od horní části paliva ke stropu prostoru (m)

z_0 virtuální střed paliva (m)

Teplo sdílené konvekcí (podíl z celkového tepelného toku)

$$Q_c = \chi_c Q$$

$$Q_c = 0,72595$$

$$Q_c = 1816,5 \text{ kW}$$

[5]

χ_c frakce konvektivní složky výkonu tepelného zdroje (-)

Q rychlost uvolňování tepla (kW)

Vztah pro virtuální střed paliva:

$$z_0/D = -1,02 + 0,083 (Q^{2/5})/D$$

$$z_0/D = 1,02 + 0,083(2595^{2/5})/2,5$$

$$z_0/D = -0,26 \text{ m}$$

$$z_0 = -0,65 \text{ m}$$

9.7 Výpočet teploty po flashoveru [28]

$$T_{\text{PFO(max)}} = 6000 (1 - e^{-0,1\Omega}) / \sqrt{\Omega} = 6000(1 - e^{-0,16,43}) / \sqrt{6,43} = 1122^\circ \text{C}$$

$$\Omega = (A_t - A_v) / A_v \sqrt{H_v} = (34,65 - 3,51) / 3,51 \sqrt{1,9} = 6,43 \text{ m}^{-1/2}$$

$T_{\text{PFO(max)}}$ maximální post-flashoverová teplota ($^\circ\text{C}$)

Ω ventilační faktor ($\text{m}^{-1/2}$)

10 Diskuse

V diskusi jsou interpretovány pouze zkoušky 1, 2, 4 a 5. Třetí zkouška nebyla s ohledem na nižší parametry požáru zkoumána a byla pojata pouze jako ilustrační, proto nebude interpretována.

10.1 Princip 1. a 2. zkoušky

Úvodní série zkoušek sloužila k demonstraci a měření v zařízení při maximálním možném tepelném výkonu. Konfigurace otvorů byla zvolena k dosažení optimálních ventilačních poměrů (viz tabulka 1). I přes tyto dobré ventilační poměry byl hmotnostní úbytek paliva v čase tak velký, že hmotnostní tok okysličovadla [10] přivedeného do prostoru nemohl zajistit spálení takového množství pyrolýzních produktů, aby se na rozhraní vrstvy přiváděného vzduchu a horní horké vrstvy plynů nerealizoval rollover. Neutrální rovina se držela v horní třetině.

Křivky průběhu teplot v měřených místech v topeništi se oproti normové teplotní křivce výrazně liší. Teplota s časem prudce vzrůstá a její pokles je pozvolný. Specifický průběh teplotní křivky, odpovídá spíše uhlovodíkové křivce. Příčinou může být soustředění paliva prakticky na ploše 2 m² a dobré podmínky pro ventilování požáru a současně dobrá tepelná izolace, kovový povrch konstrukcí a malá plocha prostoru topeniště posilující zpětné sálání a odraz tepla z konstrukcí. Ve svém výsledku to znamená, že jsou tepelné ztráty nižší, než by odpovídalo teplotní normové křivce. Dochází tak k :

- nárůstu hmotnostního toku zplodin pyrolýzy v čase,
- nárůstu hodnot hmotnostního toku vzduchu,
- nárůstu výkonu.

Tento proces se stupňuje do okamžiku dosažení kyslíkového deficitu, který už neumožňuje další růst rychlosti uvolňování tepla (maximum teplotní křivky ve spalovacím prostoru). Požár je řízen ventilací.. Tento stav je charakterizován poklesem na křivce koncentrací. Po odhoření většiny paliva se požár stává opět řízeným palivem. Ustává tvorba výrazného množství sazí a požár postupně dohořívá.

10.2 Princip 4. a 5. zkoušky

Při druhé sérii zkoušek byla omezena ventilace požáru. Vytvořené podmínky s podobaly skutečným podmínkám při požáru v uzavřeném prostoru. Odpovídaly také podmínkám, ve kterých budou hasiči působit při odborné přípravě. Aby bylo dosaženo rychle maximálního výkonu požáru, byl požár z počátku intenzivně ventilován. Byly otevřeny ventilační otvory - zadní vrata – pro zajištění rychlého rozvoje požáru, které byly při přechodu na plně rozvinutý požár uzavřeny. Kyslíkový deficit ve spalovacím prostoru zapříčinil posun reakční zóny na hranici neutrální roviny do výcvikového prostoru. Ve výcvikovém prostoru docházelo ke vzniku difusního hoření v horké vrstvě kouře na úrovni neutrální roviny. Výsledkem tohoto procesu byl jev zvaný rollover (viz obrázek). Po jeho vzniku došlo k výraznému zvýšení hodnot hustoty tepelného toku z horní horké vrstvy kouře nad kritickou mez potřebnou ke vzniku flashoveru ve výcvikovém prostoru. Zkoušku se sníženou ventilací provázel velký nárůst objemu sazí.

```
ERROR: IOError
OFFENDING COMMAND: image
```

STACK:

```
(
-FileStream-
-mark-
-saveLevel-
```