

Václav NEVRLÝ¹, Petr BITALA², Michal STŘÍŽÍK³, Zdeněk ZELINGER⁴, Pavel DANIHELKA⁵, Ondřej ZAVILA⁶, Tomáš KOLLÁRIK⁷

LABORATORNÍ STUDIE PLAMENE JAKO NÁSTROJ PRO LEPŠÍ POROZUMĚNÍ PRŮMYSLVÝM POŽÁRŮM A JEJICH ATMOSFÉRICKÝM EMISÍM

LABORATORY FLAME STUDIES AS A TOOL FOR BETTER UNDERSTANDING TO INDUSTRIAL FIRES AND THEIR ATMOSPHERIC EMISSIONS

Abstrakt

Neřízené hoření nebezpečných chemických látek, ke kterému dochází v případě průmyslových požárů, vede vedle vývinu toxických plynných zplodin hoření také ke generaci velkého množství sazových částic formovaných v důsledku neúplné oxidace meziproductů hoření. Laboratorní studie plamene je možné využít jako jeden z postupných kroků při vyšetřování fyzikálních i chemických jevů probíhajících v simulovaném prostředí laboratorního plamene i při skutečných požárech. Prostorově rozlišená měření koncentrace reaktantů, produktů a meziproductů hoření představují jednu z důležitých cest k pochopení mechanismů uplatňujících se v plameni.

Tento příspěvek shrnuje metody a techniky používané při laboratorních studiích plamene. Závěrem je navržena strategie pro studium a modelování fenoménu vzniku a atmosférického rozptylu škodlivin při průmyslových požárech s využitím těchto přístupů.

Klíčová slova: požár, emise, atmosféra, plamen, diagnostika, hořák, model

Abstract

Uncontrolled combustion of dangerous substances, as it is in the case of industrial fires, leads due to incomplete combustion to the huge emission of soot particles, burnt gases and combustion by-products. Laboratory flame studies are useful partial steps when investigating physical and chemical phenomena involved in simulated environment of laboratory flame as well as in cases of real fires. Spatially resolved measurement of reactive intermediates in the flame represents one of important ways of understanding combustion chemistry. This article summarizes methods and experimental techniques used

¹ Ing., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Laboratoř výzkumu a managementu rizik, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: vaclav.nevrly@vsb.cz; Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., Dolejšova 5, 182 23 Praha 8,

² Ing., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: petr.bitala@vsb.cz

³ RNDr., Ing., Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Laboratoř výzkumu a managementu rizik, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: michal.strizik@vsb.cz; Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., Dolejšova 5, 182 23 Praha 8

⁴ Ing., CSc., Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i., Dolejšova 3, 182 23 Praha 8, e-mail: zelinger@jh-inst.cas.cz

⁵ prof., RNDr., CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Laboratoř výzkumu a managementu rizik, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: pavel.danielka@vsb.cz

⁶ Ing., Ph.D., Ing., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: ondrej.zavila@vsb.cz

⁷ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: tomas.kollarik.st@vsb.cz; Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i., Dolejšova 3, 182 23 Praha 8

when dealing with laboratory flames diagnostics. Finally these approaches are incorporated into a proposed strategy for studying and modelling the phenomenon of atmospheric emission from industrial fires.

Keywords: fire, emission, atmosphere, flame, diagnostics, burner, model

Úvod

Z hlediska požární ochrany a bezpečnosti průmyslu je plamen studován jako zdrojový člen tepla a kouře, který může obsahovat vedle obecně přijímaných produktů hoření také řadu různorodých toxických látek a reaktivních atmosférických polutantů. Průmyslové požáry velkého rozsahu proto představují významný problém nejen na poli požární ochrany, prevence závažných havárií, havarijního plánování a ochrany obyvatelstva. Průběh a následky havárií, ke kterým došlo v nedávné minulosti, upozornily v dané spojitosti také na vážná ohrožení kvality ovzduší, resp. životního prostředí, a to často nejen v lokálním měřítku.

V brzkých ranních hodinách dne 11. prosince 2005 došlo v areálu skladu pohonných hmot společnosti Buncefield Oil v Hemel Hempstead v anglickém hrabství Hertfordshire k sérii několika explozí, které zdatelně poškodily obchodní centra i civilní objekty nacházející se v blízkosti areálu. Na doporučení složek záchranného systému byla vyklizena značná část okolí a po následujících několik dní zachvátil areál skladovacích nádrží požár produkující hustá mračna černého kouře [1,2]. V průběhu havárie byl pomocí UV-spektroskopické dálkově citlivé techniky potvrzen nárůst koncentrací SO_2 , NO_2 , HONO, HCHO a CS_2 v atmosféře [2].

V Evropě byla zaznamenána rovněž řada závažných havárií spojených s působením toxických zplodin hoření. Přibližně 700 lidí bylo v dubnu roku 1999 evakuováno z důvodu toxického kouře vznikajícího při průmyslovém požáru ve městě Bellmullet (Irsko). V červnu téhož roku (1999) bylo 90 lidí intoxikováno mrakem škodlivin uvolněným explozí v agrochemickém podniku v německém městě Wuppertal. V lednu roku 2002 vedl požár v závodě na výrobu hnojiv v Murcii (Španělsko) a následný toxický mrak k vydání doporučení setrvat uvnitř budov, kterým bylo dotčeno asi 170 000 lidí [3].

Pro účely odhadu nebezpečných účinků požáru, případně pro validaci nástrojů modelování havárií jsou tradičně využívány zejména výsledky velkorozměrových zkoušek. Tento přístup je veden snahou definovat experimentální uspořádání tak, aby co nejdříve odpovídalo skutečným podmínkám uvažovaného havarijního scénáře.

Následující text je věnován především problematice laboratorních studií plamene v kontextu výzkumu průmyslových požárů, tedy specifického typu závažných havárií, při kterých se uplatňuje hoření (plamen) jako dominantní zdrojový prvek nežádoucích havarijních účinků. Jsou uvažovány zejména účinky tepelné radiace a toxické účinky související s vývojem a šířením zplodin hoření při požárech nebezpečných chemických látek a přípravků.

Experimentální přístupy k výzkumu fenoménu průmyslových požárů

Velkorozměrové zkoušky představují při výzkumu průmyslových požárů zdroj velice cenných dat. Nicméně, takto definované experimentální úlohy je zároveň možné charakterizovat jako komplexní systém s vysokým počtem časově i prostorově závislých a současně vzájemně korelujících parametrů. Stanovení závěrů velkorozměrových experimentů, případně jejich zobecnění proto vždy vyžaduje podrobnou a korektní analýzu ovlivňujících faktorů a okrajových podmínek zajištěných při experimentu. Jako nevýhodu

tohoto přístupu je potřeba uvážit značnou náročnost realizace velkorozměrových experimentů po stránce organizační i technické. Velkorozměrové zkoušky jsou také spojeny se zvýšenými požadavky na mobilitu a odolnost přístrojového vybavení, přičemž možnosti využití některých experimentálních metod jsou omezeny časovým a prostorovým rozlišením, případně také citlivostí zvolené techniky.

Přístup zaměřený na výzkum fyzikálních a chemických jevů v laboratorním měřítku je využíván v celé řadě vědních disciplín a v posledních letech také při výzkumu procesů hoření a hašení na předních světových pracovištích v oboru požárně-bezpečnostního inženýrství. Tento přístup zahrnuje zkoumání dílčích vlastností komplexních chemických mechanismů a fyzikálně-chemických dějů za přesně definovaných (laboratorních) podmínek. Na rozdíl od velkorozměrových zkoušek je za laboratorních podmínek možné diagnostikovat odezvu systému na provedené změny okrajových podmínek. Je však potřeba podotknout, že extrapolace poznatků zjištěných v laboratorním měřítku je i přes dnešní pokročilé možnosti experimentálních metod a výpočetní techniky velice komplikovaným problémem.

Typy plamene využívané při laboratorních studiích

Plamen lze zjednodušeně charakterizovat jako strukturu reagujících a reaktivních plynů a rozptýlených pevných, případně také kapalných částic. Tento chemicky reaktivní systém má exotermický charakter, vyzařuje tedy elektromagnetické záření o intenzitě a spektru vlnových délek závislých na teplotě a chemických speciích* přítomných v daném místě a čase.

Z hlediska způsobu vytváření hořlavého souboru (formy mísení paliva a oxidačního činidla) lze dle zavedené terminologie [4-6] rozlišovat:

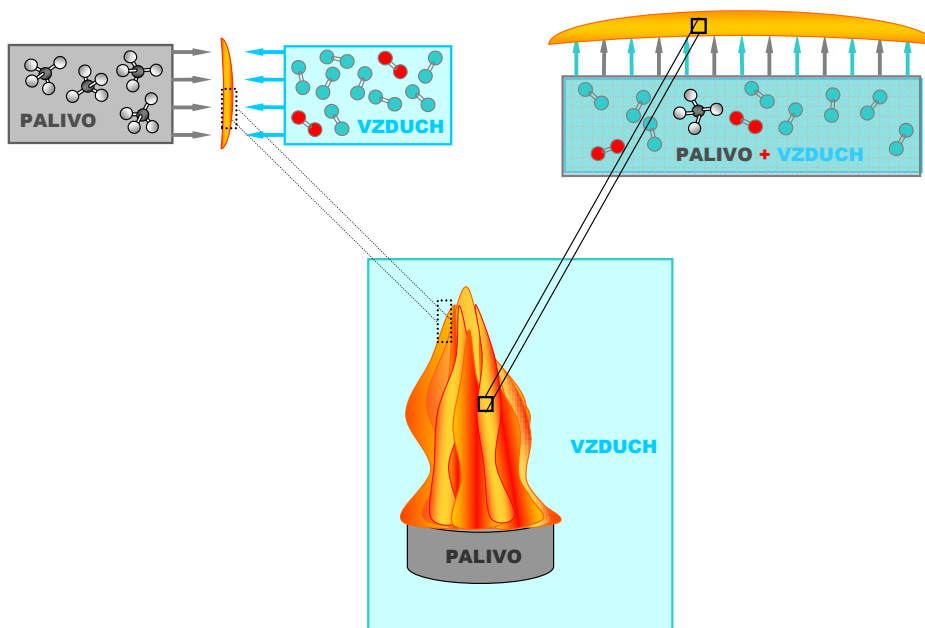
- plameny předmísené (kinetické)**;
- plameny nepředmísené (difúzní),

dle převládajícího režimu proudění, které se při hoření uplatňuje pak rozdělujeme:

- plameny turbulentní;
- plameny laminární.

* Pojem specie je užíván pro označení reaktantů, meziproductů a productů hoření. Tímto pojmem je tedy možné označit chemické látky (stabilní molekuly, radikály i například ionty) v plynném, kapalném i pevném skupenství, tedy i sazové částice.

** Termín „kinetický plamen“ je u nás spíše historicky zaveden. V zahraniční literatuře prakticky není užíván.



Obrázek 1: Ilustrativní znázornění významu difúzního (nahore vlevo) a předmíseného (nahore vpravo) plamene v laboratorním měřítku při reprezentaci plamene při skutečném požáru (dole).

Chemie hoření představuje řadu následných anebo kompetitivních chemických reakcí tvořících komplexní systém. Například mechanismus tvorby sazových částic ve své komplexnosti doposud zůstává otevřenou otázkou, třebaže značná část produktů, reaktivních intermediátů i prekurzorů sazových částic (uhlovodíkové kationty, volné radikály C_2H , C_2 , C_3 , polyaromatické uhlovodíky, acetylén, fenylnradikál, a další) již byla studována [7]. Podobně je tomu i v oblasti účinného odhadu emise a vlivu stopových množství plynných látek uvolňovaných do ovzduší během průmyslových požárů, kdy se ukazuje nedostatek vhodných predikčních metod.

Studium elementárních fyzikálně-chemických procesů souvisejících s hořením, stejně tak jako studium izolovaných chemických reakcí spalování, může být přínosné právě pro sofistikované vyšetřování pole emisí a imisí uvolňovaných do atmosféry v důsledku mimořádných událostí podobných té, ke které došlo v Hemel Hempstead.

Při zkoumání procesů hoření v laboratorním měřítku lze podle daného účelu a zaměření využít rozdílné strategie a experimentální postupy. Zatímco turbulentní nepředmísený plamen postihuje zřejmě nejlépe globální charakteristiky reálného požáru (včetně interakcí dílčích jevů a turbulence v plameni), laminární předmísený plamen je vhodný pro simulaci specifických podmínek hoření pro účely detailních studií chemických mechanismů hoření a detekce minoritních specií. Laminární difúzní plamen je často využíván pro validaci numerických modelů (sub-modelů) a testování navržených výpočetních schémat. Jeho strukturu je možné interpretovat jako lokální (*laminar flamelet*) popis turbulentního nepředmíseného plamene (viz Obrázek 1).

Standardní hořáky pro laminární plamen

Pro studium laminárního (předmíseného a difúzního) plamene v laboratorním měřítku bylo v minulosti standardizováno několik typů hořáků, které umožňují požadované nastavení

a optimalizaci parametrů plamene (přívod paliva a vzduchu, případně jiného oxidačního činidla, ředění směsi, přídavek inhibitoru nebo aditiv, atd.). Lze tak konkrétně definovat podmínky experimentu, a tudíž i zvýšit míru interpretovatelnosti naměřených dat. Níže uvedené typy laboratorních hořáků byly využity přímo v souvislosti s validací nástrojů modelování, stanovením parametrů plamene nebo účinnosti hasebních látek, případně byly použity ve fázi vývoje a kalibrace experimentálních technik a při diagnostických měřeních v plameni. Podrobnosti k typologii a konstrukčnímu řešení těchto hořáků jsou specifikovány v uvedených publikacích:

- (i) Bunsenův hořák [4];
- (ii) McKennův (flat flame) hořák [4];
- (iii) kalibrační hořák publikovaný Hartungem et al. v [8];
- (iv) Henckenův hořák [8-10];
- (v) Wolfhard-Parkerův hořák [11-13];
- (vi) protiproudý hořák [14-16];
- (vii) Santorův hořák [17-20];
- (viii) Gülderův hořák [21-23];
- (ix) McKennův hybridní hořák [24];
- (x) pohárkový hořák [25-27].

Techniky diagnostiky plamene

Při studiích motivovaných výzkumem požáru v kontextu požární ochrany a průmyslové bezpečnosti jsou obvykle sledovány veličiny popisující plamen z makroskopického hlediska. Jedná se tedy nejčastěji o globální popis plamene bez prostorového a časového rozlišení. Při vyšetřování lokálních hodnot a profilů studovaných veličin, tedy nejčastěji teploty, rychlosti proudění a koncentrace specií v plameni, jsou při laboratorních studiích využívány diagnostické metody založené na principu:

- odběru vzorku - invazivní (intrusivní);
- optických technik - neinvazivní (neintrusivní).

Prostorově rozlišená měření koncentrace reaktantů, produktů a meziproduktů hoření představují jednu z důležitých cest k pochopení mechanismů uplatňujících se v plameni.

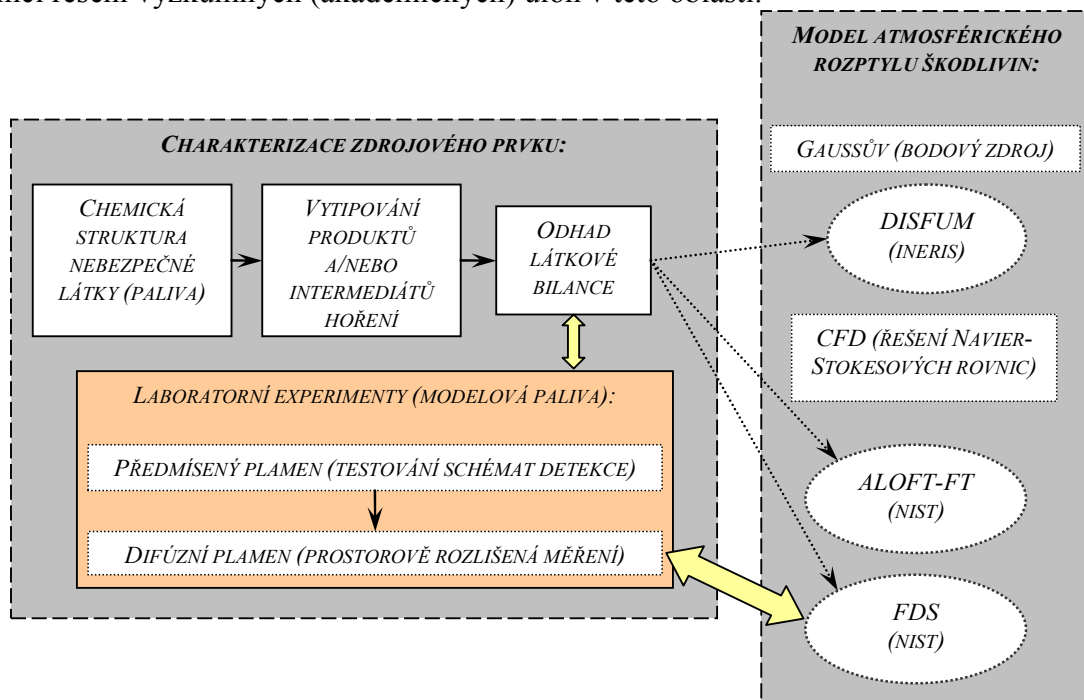
V minulosti byla za tímto účelem v laboratorním měřítku aplikována řada spektroskopických technik podrobně popsanych v publikacích [28,29]. Velice citlivou metodu často používanou na tomto poli představuje laserem indukovaná fluorescence (LIF). Klasická absorpční, případně emisní spektroskopie poskytuje nejjednodušší způsob měření absolutních koncentrací meziproduktů hoření. Při monitorování minoritních specií v prostředí plamene je přitom potřeba mít k dispozici dostatečně citlivou techniku. Proto se z metod absorpční spektroskopie při studiu procesů hoření vedle metod „*Fourier Transform Infrared*“ (FTIR) a „laditelné laser-diodové spektroskopie“ (TDLAS) velice dobře uplatnily také „*Cavity ring-down Spectroscopy*“ (CRDS) a „*Intracavity Laser Absorption Spectroscopy*“ (ICLAS). Při studiu procesů hoření jsou využívány také metody nelineární spektroskopie – „*Coherent Anti-Stokes Raman Scattering*“ (CARS), „*Degenerate Four Wave Mixing*“ (DFWM) nebo „polarizační spektroskopie“ (PS), a také „multifotonové techniky“ (např. REMPI). Soubory experimentálních dat získané s využitím těchto metod slouží jako účinná znalostní báze pro srovnání s nástroji modelování, a tedy pro ověření výpočtem stanovené predikce.

Modelování vzniku a šíření atmosférických škodlivin při průmyslových požárech

Fenomén vzniku a šíření nebezpečných zplodin hoření zahrnuje řadu dílčích aspektů, jejichž studium vyžaduje při současném stavu poznání v dané oblasti přijetí řady zjednodušení a předpokladů nutných zejména v případě definování zdrojového prvku škodlivin [30]. Laboratorní studie předmíseného a difúzního plamene se mohou v této souvislosti uplatnit zejména pro předběžnou validaci odhadované látkové bilance. Prostorově rozlišená měření v plameni mohou ve srovnání s výsledky matematického modelování pomocí nástrojů „výpočetní dynamiky tekutin“ (CFD - „*Computational Fluid Dynamics*“) sloužit jako zdroj velice cenných informací pro nastavení modelu spalování studované nebezpečné látky (viz Obrázek 2).

Pro účely následného modelování atmosférického rozptylu těchto škodlivin je možné využít výpočetní nástroje založené na tradičním „Gaussově“ modelu rozptylu jako například model DISFUM [31] vyvinutý francouzským institutem INERIS (*Institut National de l'Environnement industriel et des RISques*). Matematické modelování šíření atmosférických škodlivin založené na numerickém řešení soustavy Navier-Stokesových rovnic (CFD modelování) postihuje vlivy přítomných turbulentních struktur na specifický charakter proudění a šíření škodlivin v mezní vrstvě atmosféry. Tyto modely tedy mohou při řešení úlohy šíření kouřové vlečky zplodin požáru poskytnout (při daném časovém a prostorovém rozlišení) vyšší míru přesnosti a větší množství detailu.

V kontextu této úlohy je vhodné uvažovat zejména model ALOFT-FT [32] přímo určený pro predikci šíření kouřové vlečky v případě využití metody spalování in-situ při likvidaci ropných havárií [33]. Alternativně je šíření zplodin požáru možné simulovat v prostředí nástroje modelování požáru FDS [34]. Oba zmíněné nástroje byly vyvinuty na pracovišti BFRL NIST (*Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology*). Jejich hlavní výhodou je volná dostupnost a také informační podpora vzhledem k rozsáhlému využití v komunitě požárně-bezpečnostního inženýrství i v rámci řešení výzkumných (akademických) úloh v této oblasti.



Obrázek 2: Schématické znázornění strategie při studiu a modelování vzniku a šíření atmosférických škodlivin při průmyslových požárech.

Závěr

V případě skutečných požárů se zejména vlivem turbulentních struktur v plameni uplatňují jevy s vysoce nelineárním charakterem. Efektivní strategie testování a validace nástrojů modelování požáru by proto měla zahrnovat experimentální studie turbulentního plamene ve středním (zmenšeném) měřítku, a pokud je to možné také v reálných podmínkách.

Vzhledem ke značné náročnosti a obtížím očekávatelným při samotném provádění velkorozměrových zkoušek i následné interpretaci experimentálních dat je možné laboratorní studie plamene využít jako jeden z postupných kroků při studiu fyzikálních i chemických jevů v plameni při skutečných požárech. Možnosti laboratorních studií plamene mohou tedy v oblasti průmyslové bezpečnosti a požární ochrany najít uplatnění zejména při:

- vývoji a testování nástrojů modelování (sub-modelů) požáru nebo exploze;
- ověřování zjednodušeného popisu chemických mechanismů hoření směsných paliv;
- charakterizaci vzniku (zdrojového prvku) škodlivin při průmyslových požárech;
- vývoji diagnostických technik pro velkorozměrové experimenty a požární zkoušky.

Tyto přístupy, tedy velkorozměrové i laboratorní experimenty, je však stále potřeba chápat jako nenahraditelné a komplementární nástroje při vývoji a validaci spolehlivých modelů využitelných v požárně-bezpečnostním inženýrství a praxi průmyslové bezpečnosti.

Poděkování

Tato práce byla podpořena Ministerstvem životního prostředí České republiky (projekt č. SPII 1a10 45/07) a Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky prostřednictvím projektu FRVŠ 1111/2008 a projektů OC 111 a OC 186 v rámci Akce COST 729. Autor V.N. také děkuje Fakultě bezpečnostního inženýrství VŠB-TUO za finanční podporu v rámci Interního grantového systému (projekt č. 023/2101/BI023 8011).

Literatura

- [1] VAUTARD, R.; CIAIS, P.; FISHER, R.; LOWRY, D.; BRÉON, F.M.; VOGEL, F.; LEVIN, I.; MIGLIETTA, F.; NISBET, E. The dispersion of the Buncefield oil fire plume: An extreme accident without air quality consequences, *Atmospheric Environment*. 2007, 41, 9506–9517
- [2] MATHER, T.A.; HARRISON, R.G.; TSANEV, V.I.; PYLE, D.M.; KARUMUDI, M.L.; BENNETT, A.J.; SAWYER, G.M.; HIGHWOOD, E.J. Observation of the plume generated by December 2005 oil depot explosion and prolonged fire at Buncefield (Hertfordshire, UK) and associated atmospheric changes. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, 463 (2081), 1153-1177
- [3] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe*. Environmental issue report No 35. [on-line] Copenhagen, 2003. [cit. 2008-08-07]. Dostupný na WWW: <http://reports.eea.europa.eu/environmental_issue_report_2004_35/en/accidents_0320_04.pdf>. ISBN: 92-9167-630-6
- [4] KUO, K. K. *Principles of combustion (2nd Edition)*. New York: J. Wiley & Sons, 2005
- [5] KUMAGAI, S. *Hoření*. Přeložil Otto Dvořák. Praha: Československý svaz požární ochrany. 1984

- [6] POINSOT, T.; VEYNANTE, D. *Theoretical and Numerical Combustion (2nd Edition)*. Philadelphia: R.T. Edwards, 2005
- [7] HAMINS, A. In *Environmental Implications of Combustion Processes*. Edit by I. K. Puri. Boca Raton: CRC Press, 1993, 71 – 95
- [8] HARTUNG, G.; HULT, J.; KAMINSKI, C.F. A flat flame burner for the calibration of laser thermometry techniques. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, 17, 2485 – 2493
- [9] KULATILAKA, W.D.; LUCHT, R.P.; HANNA, S.F.; KATTA, V.R. Two-color, two-photon laser-induced polarization spectroscopy (LIPS) measurements of atomic hydrogen in near-adiabatic, atmospheric pressure hydrogen/air flames. *Combust. Flame*, 2004, 137, 523–37
- [10] SHADDIX, C.R.; ALLENDORF, S.W.; HUBBARD, G.L. OTTESEN, D.K.; GRITZO, L.A. *Diode Laser Diagnostics for Gas Species and Soot in Large Pool Fires*. LDRD Project Final Report. Sandia Report SAND2001-8383. Sandia National Laboratories. Albuquerque, 2001
- [11] NDUBIZU, C.C.; ANANTH, R.; TATEM, P.A. MOTEVALLI, V. On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 1998, 31, 253-276
- [12] WILLIAMS, T.C.; SHADDIX, C.R.; SCHEFER, R.W.; DESGROUX, P. The response of buoyant laminar diffusion flames to low-frequency forcing. *Combustion and Flame*, 2007, 151, 676–684
- [13] DELHAY, J.; BOUVIER, Y.; THERSSEN, E.; BLACK, J.D.; DESGROUX, P. 2D imaging of laser wing effects and of soot sublimation in laser-induced incandescence measurements. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2005, 81(2-3),181-186
- [14] MCNESBY, K.L.; REED SKAGGS, R.; MIZIOLEK, A.W.; CLAY, M.; HOKE, S.H.; MISER, C.S. Diode-laser-based measurements of hydrogen fluoride gas during chemical suppression of fires. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1998, 67, 443–447
- [15] HAMINS, A.; TREES, D.; SESHADRI, K.; CHELLIAH, H.K. Extinction of Nonpremixed Flames with Halogenated Suppressants. *Combustion and Flame*, 1994, 99, 221-230
- [16] MACDONALD, M.A.; JAYAWEERA, T.M.; FISHER, E.M.; GOULDIN, F.C. Inhibition of Nonpremixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, 116, 166-176
- [17] PURI, R. SANTORO,R.J. SMYTH, K. C. The Oxidation of Soot and Carbon Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, 1994, 97, 125 – 144
- [18] SHADDIX, C. R.; HARRINGTON, J. E.; SMYTH, K. C. Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane/Air Diffusion Flame. *Combustion and Flame*, 1994, 99, 723-732
- [19] KENNEDY, I. M. YAM, C. RAPP, D. C. SANTORO, R. J. Modeling and Measurements of Soot and Species in a Laminar Diffusion Flame. *Combustion and Flame*, 1996, 107, 368-382
- [20] SHADDIX, C. R.; SMYTH, K. C. Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, 1996, 107 (4), 418-452
- [21] SCHULZ, C.; KOCK, B.F.; HOFMANN, M.; MICHELSEN, H.; WILL, S.; BOUGIE, B.; SUNTZ, R.; SMALLWOOD, G. Laser-induced incandescence: recent trends and current questions. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2006, 83(3), 333-354

- [22] SNELLING, D.R.; THOMSON, K.A.; SMALLWOOD, G.J.; GÜLDER, Ö.L.; WECKMAN, E.J.; FRASER, R.A. Spectrally Resolved Measurement of Flame Radiation to Determine Soot Temperature and Concentration. *AIAA Journal*, 2002, 40, 1789-1795
- [23] GÜLDER, Ö.L.; THOMSON, K.A.; SNELLING, D.R. Effect of fuel nozzle material properties on soot formation and temperature field in coflow laminar diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, 144, 426-433, 2006
- [24] BLADH, H.; BENGTSSON, P.E.; DELHAY, J.; BOUVIER, Y.; THERSSEN, E.; DESGROUX, P. Experimental and theoretical comparison of spatially resolved laser-induced incandescence (LII) signals of soot in backward and right-angle configuration. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2006, 83(3), 423-433
- [25] ISO 14520-1. *Gaseous fire-extinguishing systems - Physical properties and system design*. Geneva: International Organization for Standardization, 2005
- [26] NFPA 2001. *Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systeme*. Quincy: National Fire Protection Association, 2008
- [27] SENECAI, J.A. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. *Fire Safety Journal*, 2005, 40 (6), 579-591
- [28] KOHSE-HOINGHAUS, K.; JEFFRIES, J.B. (Ed.) *Applied Combustion Diagnostics*. New York: Taylor & Francis, 2002
- [29] WOLFRUM, J. Advanced laser spectroscopy in combustion chemistry: From elementary steps to practical devices. *Faraday Discussions*, 2001, 119, 1-26
- [30] NIVOLIANITOU, Z.S. Hazard review of a pesticides formulation plant and consequence assessment of accident scenarios in it. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1998, 11, 123-134
- [31] MARLAIR, G.; MOUILLEAU, Y. *Modélisation des effets toxiques d'un feu sur l'environnement d'un site industriel : Importance des hypothèses relatives à la thermique*. Paris: SFT, 1998
- [32] MCGRATTAN, K.B. Smoke Plume Trajectory Modeling. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2003, 8 (4), 367-372
- [33] EVANS, D. D.; MULHOLLAND, G. W.; BAUM, H. R.; WALTON, W. D.; MCGRATTAN, K. B. In Situ Burning of Oil Spills. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2001, 106 (1), 231-278
- [34] MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; BAUM, H.; REHM, R.; MCDERMOTT, R. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide*. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1018-5, Gaithersburg, 2007

Resumé

In the field of industrial safety and fire protection, flame is studied as source term of thermal radiation and fire plume containing various combustion gases. Uncontrolled burning of dangerous chemicals as in the case of fire leads due to incomplete combustion to the huge emission of soot particles, burnt gases and combustion by-products. However, there is a lack of reliable predictive methods to assess such an emission and impact of atmospheric pollutants produced during the industrial fires.

Combustion chemistry involves complex reaction mechanisms. Verification and simplifying the chemical mechanisms of combustion for even the reference fuels remains the challenging scientific task. Contemporary progress of research in the field of combustion processes and flames is reached mainly by applying the two complementary approaches:

(i) by performing the experimental studies in different scales and (ii) by numerical simulations and modelling studies. The flames simulated in the laboratory scale can involve some aspects of real combustion systems. Experimental studies of both premixed and diffusion flames thus represent suitable tool for better understanding of combustion processes or for solving the partial issues relevant to large scale accidental phenomena. There is a variety of intrusive and optically based measurement methods for studying the flame characteristics in laboratory conditions. Among others, Fourier Transform Infrared (FTIR) and Tunable Diode Laser (TDL) spectroscopy are employed for in-situ measurements in laboratory flames as well as for spatially and/or temporally resolved concentrations profiles of even the minor species in field test fires. Nevertheless, further development and testing of diagnostic techniques for monitoring of the combustion products and intermediates is still required to improve the degree of modelling validation studies concerning industrial fire plumes.