

# ODHAD VIDITEENOSTI V POŽIARNOM ÚSEKU A JEHO VARIABILITA

## ESTIMATE OF VISIBILITY IN FIRE COMPARTMENT AND ITS VARIABILITY

JOZEF MARTINKA<sup>1</sup>, PETER RANTUCH<sup>2</sup>

**Abstract-** This paper deals with estimate of visibility in the fire compartment and its variability. Visibility in the fire compartment is one of the most important parameters for fire safety engineering (from evacuation to the fire-fighting phase). Visibility depends on the dimensions and optical properties of the observed object (light emitting object and light reflecting object) and on the extinction coefficient of combustion products. Extinction coefficient is compute from laser light beam intensity before and after its transition through combustion products and from transition length. Besides that, the extinction coefficient is dependent on the beam wavelength of used laser. Lasers used for determination of light beam intensity decrease usually have wavelength of 632.8 nm. Generally, the extinction coefficient decrease with beam wavelength increase. Besides that, the visual organ (human eye) has a selective sensitivity on the different wavelength light. Therefore, it is more correct use term visibility in the fire compartment at certain wavelength than only term the visibility in the fire compartment. The ratio between extinction coefficient determined at a light wavelength 380 nm and 780 nm can be up to 2:1. Inverse ratio is valid for visibility calculated from mentioned extinction coefficient (theoretical visibility at 780 nm wavelength is higher than visibility at 380 nm wavelength).

**Keywords** Combustion Products; Extinction coefficient; Fire Hazard; Fire Investigation; Visibility

### ÚVOD

Požiarne nebezpečenstvo materiálov a výrobkov je determinované najmä ich iniciačnými charakteristikami (teplotou vzplanutia, teplotou vznietenia a kritickým tepelným tokom), rýchlosťou uvoľňovania tepla, rýchlosťou uvoľňovania toxických produktov horenia (najmä oxidu uhoľnatého) a útlmovou plochou dymu. Uvedenými požiarными charakteristikami sa bližšie zaoberalo relatívne veľké množstvo vedeckých prác, napr. [1-4].

Požiarne nebezpečenstvo materiálov a výrobkov je významne späté najmä s produktmi horenia. Produkty horenia uvoľňované do požiarneho úseku majú, na zdravie a životy osôb, tri hlavné negatívne účinky. Prvým negatívnym účinkom je toxicita. Problematiku toxicity produktov horenia podrobne skúmali vedecké práce, napr. [5-8]. Druhým významným negatívom sú dráždiace účinky, ktoré sú opísané napr. vo vedeckých prácach [9-10]. Posledným negatívnym účinkom je pokles viditeľnosti v zasiahnutom priestore. Pre úplnosť je potrebné dodať, že produkty horenia, okrem vyššie

opísaných negatívnych účinkov, prenášajú počas požiaru teplo prúdením (najmä vo fáze pre-flashover je približne až 70 % tepla prenášané prúdením).

Údaje o toxicite produktov horenia a ich dráždivých účinkoch sú pre požiarne inžinierstvo dôležité najmä v pravej fáze rozvoja požiaru (fáza pre-flashover alebo fáza lokálneho požiaru) v ktorej prebieha evakuácia. Počas prieskumu a hasenia požiaru vstupujú do stavby (požiarneho úseku) členovia hasičských jednotiek (či už príslušníci Hasičského a záchranného zboru alebo zamestnanci závodných hasičských útvarov). Členovia hasičských jednotiek sú pred negatívnymi účinkami požiaru chránení izolačnými dýchacími prístrojmi a podľa potreby aj špeciálnymi protipožiarными oblekmi (napr. protipožiarными oblekmi odolnými voči sálavému teplu). Podstatne ťažšou úlohou je vysporiadať sa s poklesom viditeľnosti, nakoľko svietidlá a reflektory sú vo všeobecnosti voči dymu veľmi málo účinné. Na zlepšenie viditeľnosti sa preto používajú buď termovízne kamery alebo odsávacie ventilátory. Nasadenie odsávacieho ventilátora si však vyžaduje pri hasení požiaru určitý čas a jeho nesprávne použitie môže okrem toho prispieť k rýchlejšiemu rozvoju požiaru.

<sup>1</sup> Jozef Martinka, doc. Ing., PhD., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, jozef.martinka@stuba.sk

<sup>2</sup> Peter Rantuch, Ing., PhD., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, peter.rantuch@stuba.sk

Viditeľnosť v priestore zasiahnutom požiarom a jej pokles je preto veľmi dôležitým údajom pre požiarne inžinierstvo. Aplikáciou metód požiarneho inžinierstva sa zaoberá napr. vedecká práca [11]. Napriek tomu, je stanovenie viditeľnosti v priestore zasiahnutom požiarom spojené s variabilitou vyplývajúcou zo spôsobu merania útlmového koeficientu alebo útlmovej plochy produktov horenia, ktorá môže významným spôsobom ovplyvniť vypočítanú hodnotu viditeľnosti.

Cieľom predloženého príspevku je objasniť faktory, ktoré majú vplyv na variabilitu hodnoty viditeľnosti (v produktoch horenia) vypočítanú z útlmového koeficientu alebo útlmovej plochy produktov horenia.

## 1. VÝPOČET VIDITEĽNOSTI V PRODUKTOCH HORENIA

Viditeľnosť v produktoch horenia sa počíta podľa rovnice (1), ktorú uvádza a bližšie opisuje technická norma IEC 60695-6-1:2005+AMD1:2010 CSV [12]. Podobné rovnice sú uvedené napr. vo vedeckých prácach [13-14].

$$v = \gamma / k \quad (1)$$

kde  $v$  je viditeľnosť (m),  $\gamma$  je konštanta úmernosti medzi viditeľnosťou a útlmovým koeficientom produktov horenia (-) a  $k$  je útlmový koeficient produktov horenia ( $m^{-1}$ ).

Rovnica (1) je platná pre viditeľnosť v intervale 0,5 až 20 m. Hodnota konštanty úmernosti  $\gamma$  závisí od toho, či sa počíta viditeľnosť pre značky odrážajúce svetlo alebo značky vyžarujúce svetlo. Technická norma IEC 60695-6-1:2005+AMD1:2010 CSV [12] a vedecká práca [13] odporúčajú pre značky odrážajúce svetlo uvažovať konštantu úmernosti  $\gamma = 3$  a pre značky vyžarujúce svetlo  $\gamma = 8$ .

Na tomto mieste je potrebné upozorniť, že rovnica (1) je značne zjednodušená, nakoľko viditeľnosť nezávisí len od optických vlastností objektu (objekt odrážajúci alebo vyžarujúci svetlo) a od podmienok prostredia (útlmový koeficient), ale aj od vlastností zrakového orgánu (oka) a rozmerov objektu. Rovnica (1) platí pre predpoklad zdravého oka (bez krátkozrakosti, ďalekozrakosti alebo inej poruchy zraku) pre viditeľnosť štandardizovaných značiek.

Útlmový koeficient produktov horenia  $k$  je daný vlastnosťami produktov horenia (koncentráciou, geometriou a optickými vlastnosťami tuhých produktov horenia rozptýlených v zmesi plyných produktov horenia so vzduchom). Tuhé produkty horenia rozptýlené v plyne (vzduchu) sa zvyčajne označujú ako dym. Pri zachovaní štandardizovaných podmienok (konštantné zriedňovanie produktov horenia vzduchom, uvoľnených

na jednotku úbytku hmotnosti materiálu alebo výrobku) je možné útlmový koeficient považovať za požiarne charakteristiku materiálu alebo výrobku. Jeho hodnota sa stanovuje experimentálne, napr. na kónickom kalorimetri. Princíp merania opísaný v [15] je založený na zmeraní intenzity monochromatického laserového lúča pred vstupom do produktov horenia a po jeho prechode produktmi horenia. Útlmový koeficient produktov horenia sa následne počíta z rovnice (2), ktorú uvádzajú a bližšie opisujú vedecké práce [16-17]. Rovnica (2) je vlastne obdobou Beer-Lambert-Bouguerovho zákona.

$$I / I_0 = e^{-kL} \quad (2)$$

kde  $I$  je intenzita monochromatického svetelného lúča po prechode produktmi horenia (-),  $I_0$  je intenzita monochromatického svetelného lúča pred vstupom do produktov horenia (-),  $e$  je Eulerovo číslo (2,71828...) a  $L$  je vzdialenosť cez ktorú prešiel svetelný lúč v produktoch horenia (m).

Z útlmového koeficientu a objemu produktov horenia je možné vypočítať útlmovú plochu dymu podľa rovnice (3), ktorú uvádza technická norma IEC 60695-6-1:2005+AMD1:2010 CSV [12].

$$S = kV \quad (3)$$

kde  $S$  je útlmová plocha dymu ( $m^2$ ) a  $V$  je objem dymu ( $m^3$ ).

Útlmovú plochu dymu je podľa [16] možné zjednodušiť definovať, ako plochu svetelného lúča v  $m^2$ , ktorú prekryjú produkty horenia. Podľa [17] je útlmová plocha dymu daná časťou svetla, ktorá sa tuhými čiasťkami v produktoch horenia absorbuje a časťou, ktorá sa na týchto čiasťkách rozptýli.

Vedecké práce [16-17] ďalej definujú špecifickú útlmovú plochu dymu, ktorá je definovaná ako útlmová plocha dymu uvoľneného z materiálu (alebo výrobku) na jeden kilogram úbytku jeho hmotnosti. Vzájomný vzťah medzi útlmovým koeficientom, špecifickou útlmovou plochou a hmotnostnou koncentráciou častíc v produktoch horenia vyjadruje rovnica (4) [17].

$$k = S_m C \quad (4)$$

kde  $S_m$  je špecifická útlmová plocha produktov horenia vzťahovaná na 1 kg úbytku hmotnosti materiálu ( $m^2/kg$ ) a  $C$  je hmotnostná koncentrácia tuhých čiasťkami v produktoch horenia ( $kg/m^3$ ).

Z rovníc (3 a 4) teda vyplýva, že pre výpočet hmotnostnej koncentrácie tuhých čiasťkami v produktoch horenia stačí poznať špecifickú útlmovú plochu dymu a jeho objem.

## 2. VARIABILITA HODNOTY ÚTLMOVÉHO KOEFICIENTU PRODUKTOV HORENIA

Útlmový koeficient nie je konštantný, ale jeho hodnota závisí od vlnovej dĺžky svetelného lúča. Podľa [16] vyjadruje závislosť útlmového koeficientu od vlnovej dĺžky monochromatického svetelného lúča rovnica (5).

$$k = x / \lambda \quad (5)$$

kde  $x$  je konštanta (-) a  $\lambda$  je vlnová dĺžka svetelného lúča (m).

Podľa [18] je závislosť útlmového koeficientu od vlnovej dĺžky monochromatického svetelného lúča vyjadrená rovnicou (6).

$$k = x / \lambda^n \quad (6)$$

kde  $n$  je empiricky stanovená bezrozmerná konštanta, ktorá závisí od materiálu a vo všeobecnosti sa mení s vlnovou dĺžkou monochromatického svetelného lúča (má hodnotu v intervale od 1 do 2).

Z rovníc (5 a 6) teda vyplýva, že pri stanovení útlmového koeficienta produktov horenia je potrebné poznať vlnovú dĺžku monochromatického svetla, pri ktorej bol pokles intenzity svetelného lúča stanovený.

Podľa [19] je svetlo definované, ako elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou 380 až 780 nm (na vlnovej dĺžke približne 380 nm ľudské oko začína vnímať fialovú farbu a na vlnovej dĺžke približne 780 nm prestáva vnímať červenú farbu). Ak by pre závislosť útlmového koeficientu od vlnovej dĺžky svetla platila rovnica (5), znamenalo by to, že hodnota zmeraná pri svetle s vlnovou dĺžkou 380 nm by bola viac ako 2 krát väčšia, ako hodnota stanovená pri vlnovej dĺžke 780 nm. Pri aplikácii rovnice (6) by bol rozdiel ešte väčší. Pri dosadení útlmového koeficientu  $k$  do rovnice (1) by bol pomer viditeľnosti pre útlmový koeficient zmeraný pri vlnovej dĺžke 380 nm a 780 nm 1:2.

V skutočnosti je však situácia ešte komplikovanejšia. Viditeľnosť štandardizovaných značiek (pri predpoklade zdravého oka) totiž nezávisí len od parametrov prostredia (útlmový koeficient produktov horenia alebo všeobecne prostredia), ale aj od vlastností zrakového orgánu (oka). Veľmi dôležitou vlastnosťou je spektrálna citlivosť oka. Ľudské oko totiž nevykazuje rovnakú citlivosť na všetky vlnové dĺžky. Podľa [19] vykazuje ľudské oko pri dennom fotopickom videní maximálnu citlivosť na svetlo s vlnovou dĺžkou približne 555 nm (zelená farba). Pri nočnom skotopickom videní vykazuje ľudské oko maximálnu citlivosť na svetlo s vlnovou dĺžkou približne 507 nm [19]. Pre úplnosť je potrebné dodať, že značky v únikovej ceste (označujúce smer úniku a únikové východy) majú zelenú farbu, teda farbu na ktoré je zdravé ľudské oko najcitlivejšie.

Útlmový koeficient produktov horenia sa najčastejšie meria laserom s vlnovou dĺžkou 632,8 nm (túto hodnotu vlnovej dĺžky uvádza napr. aj vedecká práca [20]). Preto korektnejším termínom ako viditeľnosť v požiarnom úseku je odborný termín viditeľnosť v požiarnom úseku pri vlnovej dĺžke 632,8 nm. Aj toto konštatovanie je však platné (korektné) len čiastočne, nakoľko nezohľadňuje selektívnu citlivosť ľudského oka na rôzne vlnové dĺžky.

Preto pri praktických aplikáciách v ktorých sa v požiarnom inžinierstve počíta (odhaduje) viditeľnosť v požiarnom úseku, je potrebné uvádzať aj vlnovú dĺžku monochromatického svetla pri ktorej bol zmeraný útlmový koeficient. Bez poznania vlnovej dĺžky je potrebné uvažovať s faktom, že viditeľnosť pri iných vlnových dĺžkach sa môže meniť až v rozsahu približne 50 % (nie je potrebné uvažovať s extrémami, nakoľko meranie v blízkosti limitných vlnových dĺžok 380 a 780 nm nie je pravdepodobné).

Pri výpočte viditeľnosti vo fáze zdolávania požiaru je potrebné uvažovať navyše s faktom, že počas evakuácie je prioritná viditeľnosť značiek (ktoré majú zelenú farbu, na ktoré je ľudské oko najcitlivejšie), zatiaľ čo pri zdolávaní požiaru viditeľnosť značiek nie je jediná priorita (hasiči vstupujú do stavby a preto majú z hľadiska viditeľnosti nepriaznivejšie podmienky ako osoby vo fáze evakuácie).

Analýzovaná variabilita zohľadňuje len vplyv vlnovej dĺžky monochromatického svetla použitého pri meraní útlmového koeficientu na jeho hodnotu. Viditeľnosť v produktoch horenia ďalej závisí aj od iných faktorov, ktoré v predložennom článku neboli analyzované (najmä nehomogenita vrstvy dymu). Tento faktor však súvisí už priamo s podmienkami v konkrétnom požiarnom úseku (požiarnom scenári). Predložený článok teda analyzoval vplyv variability pri meraní hodnôt potrebných na výpočet viditeľnosti (materiálových vlastností potrebných pre výpočet), nie variabilitu pri výpočte pre konkrétne požiarné scenáre.

## ZÁVER

V predložennom článku bol opísaný spôsob výpočtu viditeľnosti v požiarnom úseku vo vrstve produktov horenia zo známeho útlmového koeficientu produktov horenia a variabilita pri meraní tohto koeficientu. Najdôležitejšími faktormi, ktoré je potrebné pri tomto výpočte zohľadniť je závislosť útlmového koeficientu produktov horenia od vlnovej dĺžky (s narastajúcou vlnovou dĺžkou útlmový koeficient produktov horenia klesá a viditeľnosť narastá) a selektívna citlivosť ľudského oka na svetlo rôznych vlnových dĺžok.

Útlmový koeficient alebo útlmová plocha dymu, resp. špecifická útlmová plocha dymu (zmeraná pri rovnakej vlnovej dĺžke) umožňuje exaktné porovnanie materiálov z hľadiska ich vplyvu na pokles viditeľnosti v priestore (požiarnom úseku) počas požiaru. Útlmový koeficient rovnako umožňuje výpočet viditeľnosti v požiarnom úseku (vo vrstve produktov horenia). Pri praktickej aplikácii takto vypočítanej hodnoty je však potrebné zohľadniť vyššie uvedenú variabilitu a počítať s tým, že skutočná viditeľnosť sa môže od takto vypočítanej viditeľnosti líšiť.

## POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-16-0223.

## ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Zachar, M., Majlingová, A., Mitterová, I., Čabalová, I. Influence of an age and damage of the oak wood on its fire risk. In: *Wood Research* 2017, 62(3):495-504.
- [2] Osvaldova, L. M., Gasparik, M., Castellanos, J. R. S., Markert, F., Kadlicova, P., Cekovska, H. Effect of thermal treatment on selected fire safety features of tropical wood. In: *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina* 2018, 20(2):3-7.
- [3] Svetlík, J. Fázy požiaru osobného motorového vozidla. In: *Advances in fire and safety engineering 2012: zborník príspevkov z I. medzinárodnej vedeckej konferencie*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene 2012, s. 257-267.
- [4] Coneva, I. Stanovenie zápalnosti v teplovzdušnej peci vybraných celulóзовých materiálov. In: *Ochrana obyvateľstva - Zdravotní záchranáři : sborník příspěvků z mezinárodní konference* 2016, s. 11-15.
- [5] Woolley, W. D., Fardell, P. J. The prediction of combustion products. In: *Fire Safety Journal* 1977, 1(1):11-21.
- [6] Andersson, B., Markert, F., Holmstedt, G. Combustion products generated by hetero-organic fuels on four different fire test scales. In: *Fire Safety Journal* 2005, 40(5):439-465.
- [7] Li, Y. Z., Ingason, H. Influence of fire suppression on combustion products in tunnel fires. In: *Fire Safety Journal* 2018, 97(1):96-110.
- [8] Kim, N. K., Kang Y. S., Rie D. H. Estimating toxic harmfulness based on quantitative analysis (I) - Factor analysis of harmfulness of combustion products on building materials. In: *Fire Safety Journal* 2019, 106(1):80-87.
- [9] Purser, D. Validation of additive models for lethal toxicity of fire effluent mixtures. In: *Polymer Degradation and Stability* 2012, 97(12):2552-2561.
- [10] Stec, A. A., Readman J., Blomqvist, P., Gylestam, D., Karlsson, D., Wojtalewicz, D., Dlugogorski, D. Z. Analysis of toxic effluents released from PVC carpet under different fire conditions. In: *Chemosphere* 2013, 90(1):65-71.
- [11] Osvald, A., Mózer, V. Požiarne inžinierstvo ako metóda navrhovania požiarnej bezpečnosti. In: *Advances in fire and safety engineering 2012: zborník príspevkov z I. medzinárodnej vedeckej konferencie*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene 2012, s. 211-223.
- [12] IEC 60695-6-1:2005+AMD1:2010 CSV. *Fire Hazard Testing. Part 6-1: Smoke Obscuration - General Guidance*, 2nd ed.; International Electrotechnical Commission: Geneva 2010, 84 s.
- [13] Jin, T. Visibility through fire smoke. In: *Journal of Fire and Flammability* 1978, 9(1):135-157.
- [14] Yamada, T., Akizuki, Y. Visibility and human behavior in fire smoke. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5. vyd., Hurley, M. J. editor, New York: Springer 2016, s. 2181-2206.
- [15] Babrauskas, V. The cone calorimeter. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2. vyd., Hurley, M. J. editor, New York: Springer 2016. s. 952-980.
- [16] Ostman, B. A. L. Smoke and soot. In: *Heat Release in Fires*, 2. vyd., Babrauskas, V., Grayson, S. J., editori, Londýn: Interscience communications 2009. s. 233-250.
- [17] Babrauskas, V., Mulholland, G. W. Smoke and soot data determinations in the cone calorimeter. In: *Mathematical Modeling of Fires, ASTM STP 983*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials 1987. s. 83-104.
- [18] O'Sullivan, E. F., Ghosh. B. K. . The spectral transmission 0.5-2.2  $\mu\text{m}$  of fire smokes. In: *Proceedings of the Combustion Institute European Symposium*. Londýn: Academic Press 1973. s. 195-200.
- [19] Sokanský, K. et al. Světelná technika. Praha: ČVUT 2011. 256 s.
- [20] Khan, T. M., Tewarson, A., Chaos, M. Combustion characteristics of materials and generation of fire products. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5. vyd., Hurley, M. J. editor, New York: Springer 2016, s. 1143-1232.