



## MODEL Y ŠÍŘENÍ OHNĚ A TOXICKÝCH PLYNŮ PŘI HAVÁRIÍCH V TUNELECH

Zpracovali: Ing. Kamila Horová, prof. Ing. František Wald, CSc. (Fakulta stavební ČVUT v Praze)

### Souhrn

Modelování šíření ohně a toxických plynů při haváriích v tunelech umožňuje připravit a ověřit modely bezpečné evakuace osob. Složitý a vysoce komplexní problém šíření ohně a plynů v tunelu lze řešit metodou dynamické analýzy plynů (CFD). Pomocí software FDS (Fire Dynamic Simulator) [1], který využívá CFD metodu, lze simulovat rozvrstvení teploty a toxických plynů při požáru, které se spolu s viditelností považují za nejdůležitější parametry ovlivňující bezpečnost osob při haváriích v tunelech.

### Oblast použití

Nové poznatky získané při řešení této problematiky umožní vypracování pokročilých simulací evakuace při požárech v tunelech, které jsou dílčím cílem 6.4.2. Konečným výstupem bude metodika pro strategie bezpečné evakuace implementovaná do českého normativního prostředí v oblasti bezpečnosti dopravy v tunelech.

### Metodika a postup řešení

Sběrem dostupné tuzemské i zahraniční literatury byl popsán současný stav problematiky modelování šíření požáru a toxických látek v tunelech.

Dynamiku plynů při požáru v tunelech lze stejně jako při požáru v budovách popsat pomocí tří fází: fáze rozvoje, fáze ustáleného hoření a fáze útlumu. Tyto fáze jsou ovlivněny množstvím paliva, ventilačními podmínkami, geometrií a konstrukčním provedením tunelu.

Díky velkým tepelným ztrátám do okolních konstrukcí a úniku horkých plynů směrem k portálům v tunelech na rozdíl od požáru v uzavřeném prostoru nedochází k celkovému vzplanutí (tzv. flashoveru). Flashover může naopak snadno nastat v uzavřených prostorech vlakových vagonů či v kabinách vozidel. Vlivem velkého množství vzduchu přistupujícímu k hoření v důsledku přirozeného či nuceného větrání v tunelech dochází téměř vždy k požáru řízenému palivem. Požár řízený ventilací byl zaznamenán

pouze v několika případech, kdy plameny pohltily více dopravních prostředků – např. požár v tunelu Mont Blanc, Taury v roce 1999 (v plamenech 18 nákladních vozidel, 9 osobních vozidel, 1 dodávka a 1 motocykl – odhadem 190 MW, teploty více než 1000 °C, [2]) a požár v tunelu St. Gotthard, Švýcarsko, 2001 (23 vozidel v plamenech) [3].

Ve fázi útlumu oheň uhasíná převážně kvůli nedostatku paliva, zřídka přechází k požáru řízenému ventilací. V případě řízení ventilací dojde podle [4] k uhasnutí požáru při snížení obsahu kyslíku ve vzduchu na 13 %. Podle [5] vysoké proudění a tepelný tok odrážející se od okolních konstrukcí zpět k palivu způsobuje až čtyřnásobné uvolnění tepla při hoření v porovnání s hořením v otevřeném prostoru. Při rychlosti proudění 10 m/s může hodnota uvolněné energie dosáhnout až desetinásobku energie uvolněné v otevřeném prostoru.

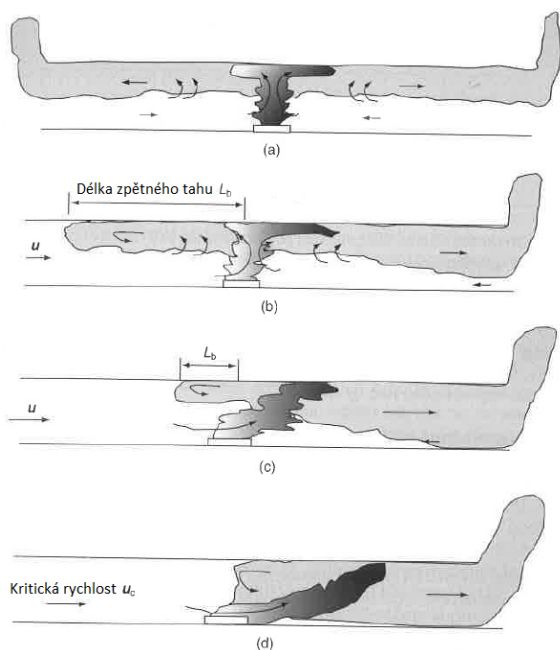
S rozvojem požáru v tunelu dochází ke změnám proudění plynů, které ovlivňují formování a směr pohybu horké podstropní vrstvy zplodin. Horká vrstva plynů nashromážděná pod stropem tunelu je ovlivněna velikostí požáru, způsobem větrání a výškou tunelu. V případě nízké rychlosti proudění vzduchu (0 – 1 m/s, většinou přirozeného větrání) se vrstva šíří na obě strany tunelu od ohniska téměř rovnoměrně – obr. 1a. Při zvýšení rychlosti proudění k hranici 1 m/s dochází ve vzdálenosti přibližně sedmnáctinásobku výšky tunelu k obrácení zpětného tahu kouře směrem ke zdroji hoření – obr. 1b. Při střední rychlosti vzduchu (1 – 3 m/s) dochází ke zkrácení vrstvy kouře zpětného tahu na délku nula až sedmnáctinásobek výšky tunelu – obr. 1c. Vysoká rychlost proudění vzduchu (více než 3 m/s, nucené větrání) způsobuje pohyb kouřové vrstvy zejména ve směru proudění – obr. 1d. Rychlost proudění, při které je zpětný tah kouře nulový, se nazývá kritická rychlost.

Teplota plynu a rozvrstvení toxických plynů při požáru spolu s viditelností jsou klasifikovány jako nejdůležitější parametry ovlivňující bezpečnost osob při haváriích v tunelech. Tyto parametry, stejně jako délku plamene pod stropem tunelu, kterou je nutné znát k posouzení šíření požáru mezi více vozidly, lze

vypočítat podle jednoduchých empirických vztahů. Cílem je však určit přesné chování požáru a šíření toxických látek v tunelu, které odpovídá skutečnosti.

K simulaci hoření v tunelech lze využít metodu dynamické analýzy plynů (CFD). Software FDS [1], který byl vybrán pro řešení problematiky je na základě CFD metody založen na výpočtech rovnic zachování a přenosu energie, hmoty a hybnosti v každém z kontrolních objemů (metoda konečných objemů). Řešením Navier-Stokesových rovnic pro nestacionární proudění s ohledem na přenos tepla a kouře lze popsat výše zmíněné hledané veličiny. Míra přesnosti předpovědi šíření požáru závisí na správnosti veličin vstupujících do výpočtu. Výběru geometrie objektu, materiálových charakteristik, kinetiky spalování a dalším okrajových podmínkách je proto věnována velká pozornost. Rychlosti uvolňování tepla objektů, které mohou v tunelech hořet, pocházejí z experimentálních studií požáru v tunelu popsaných v literatuře.

Výstupem numerických simulací se předpokládají následující veličiny: teploty plynu, rychlosti proudění, koncentrace  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  a vodních par, koncentrace kouře, tlak, rychlost uvolňování tepla. V rámci modelování se plánuje studie vlivu okrajových podmínek na výsledky, vlivu umístění a velikosti zdroje zapálení na výsledky, vlivu velikosti buněk sítě na výsledky a studie šíření požáru mezi hořlavými objekty. K ověření správnosti výpočtů se plánuje využít verifikaci modelu v softwaru SmartFire [6]. Validace modelu bude provedena na základě experimentálních dat z literatury.



Obr. 1 Schéma šíření kouře v závislosti na rychlosti proudění vzduchu v tunelu: a) nízká rychlost proudění ( $0 - 0,3 \text{ m/s}$ ), b) proudění na hranici nízké rychlosti ( $1 \text{ m/s}$ ), c) střední rychlost proudění ( $1 - 3 \text{ m/s}$ ), d) vysoká rychlost proudění (více než  $3 \text{ m/s}$ ) [7].

## Výsledky

V uplynulém roce byla nastudována tuzemská i zahraniční literatura popisující historii požárů při haváriích v tunelech, požární zkoušky v tunelech, možnosti vybavení tunelů pasivními a aktivními prvky protipožární ochrany, větrání v tunelech, lidské chování a nouzové záchranné postupy v případě požáru v tunelech. Problematika dynamiky požáru a šíření toxických látek v tunelech byla shrnuta v odborné studii. Na základě popsaných vědomostí byl pro výpočet modelů vybrán software FDS, který je schopen řešit teploty a rozvrstvení toxických plynů při požární situaci. V závislosti na přesnosti předpovědi havarijních scénářů byla stanovena míra přesnosti vstupů potřebných pro výpočet. Z požárních experimentů popsaných v zahraniční literatuře byly vybrány rychlosti uvolňování tepla pro objekty, které se mohou v tunelech vyskytovat a účastnit se procesu hoření.

## Literatura

- [1] McGrattan, K., Hostinka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., *Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide*, NIST Special Publication 1018-5, p. 86, October 2007, U.S. Government Printing Office, Washington, 2007.
- [2] Lacroix, D., The Mont Blanc Tunnel Fire: what happened and what has been learned. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Madrid, Spain, 2001, pp. 3-16.
- [3] Turner, S., St. Gotthard Tunnel Fire. *New Civil Engineer* 1 November: 5 – 7, 2001.
- [4] Beyler, C., Flammability limits of premixed and diffusion flames, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995, pp. 2-147-160.
- [5] Carvel, R., Beard, A., Jowitt, P., Drysdale, D., Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicles in tunnels, *Fire Safety Journal* 36 (6): 569-596.
- [6] Ewer, J., Jia, F., Grandison, A., Galea, E., Patel, M., *SmartFire – User guide and technical manual*, Smartfire tutorials, March 2013.
- [7] Beard, A., Carvel, R., et al., *Handbook of Tunnel Fire Safety*, ICE Publishing, Second edition, 2005.