<u>PROCESY DEFLAGRAČNÍHO HOŘENÍ METANOVÝCH VRSTEV A TLAKOVÉ</u> <u>PROJEVY METANOVZDUŠNÝCH SMĚSÍ VE STAVEBNÍM OBJEKTU</u>

Abstakt

V následujícím textu jsou presentovány výsledky dílčí experimentální části projektu MV VG20102013055 "Aktualizace havarijních plánů ve vztahu k mimořádným událostem při provádění hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem ve spolupráci s hasičským záchranným sborem pro zajištění bezpečnosti měst a obcí při provozních haváriích, včetně bezpečnosti podzemních objektů" zaměřené v jedné fázi na sledování ovlivnění deflagračních procesů při hoření metanových vrstev v podmínkách pokusných štol ve Štramberku a v druhé fázi na pokusná měření tlakových projevů při zapálení metanovzdušných směsí v bývalém technologickém objektu ohřevu vtažných větrů v areálu GEAM Dolní Rožínka, provoz Zlaté Hory.

ABSTRACT

In the following paper are presented results of the experimental part of MV VG20102013055 project: "Actualisation of emergency plans in relation to exceptional events during mining activities and activities of mining character in cooperation with a fire brigade for securing of city safety during operational accidents; including safety of underground premises." In the first phase, the project focuses on monitoring of deflagration processes during combustion of methane layers in conditions of experimental tunnels in Štramberk. In the second phase of the project are performed experimental measurements of pressure effects during ignition of methane-air mixtures in the former Technological compound for study of intake wind heating in GEAM Dolní Rožínka, section Zlaté Hory.

Klíčová slova: Výbuch, deflagrace, metanová vrstva, turbulizace, výbuchový tlak

Procesy deflagračního hoření metanových vrstev

Jednou z dílčích částí projektu MV VG20102013055 řešeného společností VVUÚ, a.s. bylo ověření ovlivňujících faktorů šíření a útlumu výbuchových vln metanovzdušných směsí v podzemních objektech. S ohledem na řešení tohoto dílčího cíle byla v areálu pokusných štol ve Štramberku provedena série experimentálních zkoušek zapálení a ovlivnění procesu deflagrace metanových vrstev turbulizačními prvky v malém a poté i ve velkém měřítku.

Pro zjištění základních poznatků o vytváření metanové vrstvy, její iniciaci, procesu hoření a ovlivnění tohoto procesu turbulizačními prvky, byla nejprve prováděna experimentální měření v ocelové rouře z obou stran otevřené, kryté PE fólií (postupně kryté poklopem ze strany A v kombinaci s turbulizačními prvky), o průměru 630 mm a délce 3 m, která sloužila jako zkušební komora. Celkový objem komory byl 0,94 m³. Komora byla osazena třemi křemíkovými fotodiodami pro snímání vyzařování plamene a jedním snímačem tlaku s měřícím rozsahem 0 až 10 kPa. Osazení měřícími prvky viz Obr. 1.

Vzhledem k celkovému množství 34 provedených zkoušek uvádí Tabulka 1 pouze reprezentativní výsledky zkoušek za srovnatelných podmínek, z nichž je patrné ovlivnění procesu hoření při různých konfiguracích zkoušky.

Tabulka 1									
Číslo zkouš ky	Tloušť ka CH₄ vrstvy [cm]	Ø konc. před odpale m [% obj.]	Turbuliz ační prvky/Po klop	Rychlost čela plamene mezi čidly F1 a F2 [m.s ⁻¹]	Rychlost čela plamene mezi čidly F2 a F3 [m.s ⁻¹]	Max. tlak v komoře [kPa]			
15	30	10,5	ANO/NE	4,46	23,08	0,91			
16	30	11,1	ANO/NE	3,32	18,18	0,84			
22	30	9,6	ANO/AN O	5,66	37,5	0,58			
23	30	10,9	ANO/AN O	6,32	36,36	0,70			
32	30	9,42	NE/ANO	2,35	2,19	1,09			
34	30	7,9	NE/ANO	3,59	4,48	0,93			

Při těchto pokusech byl potvrzen předpoklad, že metanová vrstva, stejně jako homogenně promíchaná metano-vzdušná směs, pokud je dostatečně zturbulizovaná, podstatně zvyšuje rychlost šíření plamene a tím vzrůstá prudkost (brilance) výbuchu. Z tabulky lze vyčíst, že při dostatečné turbulizaci hořlavé směsi se hoření s časem zrychluje a oproti hoření metanu bez turbulizačních prvků je rychlost šíření čela plamene turbulentní směsi až o řád vyšší při dané konfiguraci zkoušek.

Po provedených pokusech v cca jednokubíkové komoře byly režimy hoření metanové vrstvy modelově testovány v komorách podstatně větších. Ve velké pokusné štole za hrázovým objektem byly vytvořeny metanové komory o délce 5 m a 10 m, které byly od ostatních prostor odděleny PE folií. Objem 5 m komory byl 54 m³ a objem 10 m komory 102,5 m³. Další technická data jsou uvedena níže:

- světlý průřez zkušební komory 8,8 až 11,9 m²,
- průměrná světlá výška zkušební komory 2,86 m,
- max. tloušťka metanové vrstvy 70 cm,
- monitorování koncentrace metanu ve třech hladinách od stropu díla tj. 0 cm, 25 cm, 50 cm,
- max. koncentrace CH₄ pod stropem 65-70 %,
- tři řady turbulizačních prvků, koeficient seškrcení BR = 0,225,
- čtyři tlaková čidla nainstalovaná od místa iniciace ve vzdálenostech T1 = 2,2 m; T2 = 17,5 m; T3 = 76,2 m; T4 = 122,2 m ve výšce 1,4 m na levé straně pokusné štoly, dále jedenáct fotodiod pro sledování šíření plamene ve štole,
- k iniciaci metanové vrstvy byl použit palníkový "stromeček" složený z čtyř párů el. palníku SO-ANTI vertikálně umístěných pod sebou v pravidelných 20 cm rozestupech,
- napouštění metanu hadicí pod strop komory u hráze (v čase 60 až 120minut).

Schématické uspořádání turbulizačních prvků, iniciace a měřících čidel uvnitř metanové komory ilustruje Obr. 2. Bylo provedeno celkem třináct měření, Grafy 1, 2 a 3 prezentují tlakové průběhy po iniciaci metanové směsi při různých konfiguracích zkoušek (blíže [1]).

Na základě analýzy záznamů z experimentálních měření v pokusné štole VVUÚ, a.s., ve Štramberku, lze definovat (pro desetimetrovou komoru) tyto poznatky:

- v blízké oblasti místa iniciace metanové vrstvy se vyskytují minimální tlakové projevy,
- výbuchové tlaky dosahují hodnot až 13 kPa při iniciaci 10 m CH₄ vrstvy a to ve vzdálenosti cca 75 m od místa iniciace,

- metanová vrstva, iniciovaná od hrázového objektu, vytváří urychlující se frontu plamene, která zvětšujícími se ohřátými zplodinami vytlačuje negenerovaný CH₄ mimo 10 m zónu,
- plamenná zóna postupem času urychluje svůj postup,
- ve vzdálenosti ≈ 20 m (dvojnásobná délka metanové vrstvy) dochází k nejintenzivnějšímu hoření CH₄,
- v třínásobné vzdálenosti metanové vrstvy (≈ 30 m) dochází k útlumu plamenné zóny,
- maximální dosah plamene je ve vzdálenosti 4,5 násobku délky vrstvy (≈ 45 m),
- maximální rychlosti plamene dosahují až 95 m/s.

Při řešení havarijních situací zapálení metanových vrstev, nelze striktně konstatovat, že místo největších destrukcí je místo iniciace výbušného systému. V porovnání s výsledky dřívějších experimentů jsou hodnoty maximálních tlaků metanových vrstev přibližně o řád nižší oproti hodnotám maximálních tlaků homogenizovaných metanovzdušných směsí u kterých tlaky turbulizovaných směsí dosahovaly hodnot až 200 kPa. Výbuchová vlna metanové vrstvy uvedených parametrů spolehlivě dostává usazený uhelný prach do vznosu, který postupující fronta plamenů může iniciovat. Při režimu hoření je kinematika procesu hoření silně závislá na turbulizačních prvcích, čímž se zvyšuje riziko havarijních situací a jejich následků. Vhledem k variabilitě prostředí, je nutno při řešení jak preventivních opatření, tak havarijních situací uvažovat o nejnepříznivějších režimech výbuchových přeměn.

Tlakové projevy metanovzdušných směsí ve stavebním objektu

Druhou dílčí experimentální části projektu MV VG 20102013055 bylo ověření možného vlivu výstupu metanu ze starých uzavřených důlních děl na objekty infrastruktury měst a obcí. Pro řešení této části byla vytipována stará, nepoužívaná technologická budova dříve sloužící k ohřevu vtažných důlních větrů v areálu bývalého rudného dolu v areálu GEAM Dolní Rožínka provoz Zlaté Hory. Tato budova (Obr. 3 a Obr. 4), o celkové půdorysné zastavěné ploše cca 320 m², jenž má být zdemolována, plně vyhovovala k provedení série experimentálních testů zapálení homogenních metanovzdušných směsí a sledování tlakových projevů v dispozičně a objemově odlišných místnostech tohoto objektu (viz Obr. 5).

Vnitřní výbuchy plynu (v našem případě metanu, či zemního plynu) v budovách infrastruktury mají charakter ventilovaných výbuchů (okna, dveře, odlehčené plochy) a na rozdíl od plně uzavřených výbuchů je vygenerovaný tlak závislý na objemu, geometrii ohraničení, vnitřním zahrazení a rychlosti hoření. Je nutno si uvědomit, že se v těchto podmínkách jedná o výbuchové děje s charakterem deflagračního hoření s tlakovými účinky. Ideální průběh ventilovaného výbuchu má dvě tlaková maxima, první je charakterizováno rozvojem výbuchového děje a nárůstem tlaku v čase, následuje odstranění ventilu ("otevření" stavebně nejslabšího prvku) s poklesem tlaku ventilací, dále je dosaženo maximální plochy plamene (zároveň i druhého tlakového maxima) a následuje odventilování tlaku daného zplodinami hoření a prudkým nárůstem teplot. Absolutní velikosti a rozdíly obou tlaků jsou mj. závislé na velikosti plochy a odporu materiálu (adekvátně plocha a hmotnost ventilu).

Podle hodnocení odhadu parametrů ventilovaných výbuchů Janovským [2] velmi dobře dle [3, 4] vyhovují hodnotám prvního a druhého tlaku P_1 a P_2 následující rovnice:

$$P_1 = S_0 \cdot \frac{(4,3 \cdot K \cdot W + 28)}{V^{\frac{1}{3}}}$$
(1)

$$P_2 = 58 \cdot S_0 \cdot K \tag{2}$$

kde P_1 a P_2 jsou v milibarech, S_0 je laminární rychlost hoření plynu v m.s⁻¹, V je objem uzavřeného prostoru v m^3 a W je plošná hmotnost ventilu v kg m^2 . k

Koeficient
$$K$$
 je poměr plochy stěny, ve které je otvor ku ploše ventilu:

$$K = \frac{A_s}{A_v} \tag{3}$$

Existuje-li v místnosti zahrazení (překážky) násobí se S₀ koeficientem 1 – 5, který vyjadřuje turbulizační urychlení výbuchového děje.

Protože se profesně pohybujeme na pokusných štolách ve Štramberku převážně v prostoru 1D nebo 2D šíření výbuchových vln (byť konkrétní zkušenosti s ventilovanými výbuchovými ději máme [5]), pokusili jsme se predikovat očekávaná tlaková maxima podle vztahů Cubbage a Simmondse (1) a (2), jejichž podmínkám použití rámcově odpovídala první místnost. Maximální hodnota druhého tlakového maxima by mohla dosáhnout až 17,45 kPa a u prvního tlakového maxima 7 až 9 kPa (hodnota W stanovena technickým odhadem). Protože iniciace nebyla předpokládána v těžišti místnosti, ale u stěny, daly se očekávat skutečné tlakv nižší.

Základní geometrické parametry v návaznosti na Obr. 3 a Obr. 5 jsou shrnuty v Tabulce 2. Tabulka 2

Místnost	Výška místnosti [m]	Půdorys [m²]	Objem [m³]	Plocha výfukových otvorů [m ²]
1.	3,75	9,0	33,6	1,6
11.	4,25	17,6	74,6	8,9 + 15,0
111.	4,25	12,3	52,2	12,8

Další technická data, podklady a podmínky zkoušek byly následující:

- pro zaplynování dílčích místností I. až III. objektu byl použitý zemní plyn v tlakových láhvích s ověřenou analýzou obsahu metanu 92%,
- homogenizace směsi prováděna pomocí ventilátoru byla elektrického _ v nevýbušném provedení o průměru 400 mm, který byl stabilizován přibližně v rohu na podlaze místnosti a nasměrován v prostorové úhlopříčce,
- zemní plyn byl přiváděn před sací část ventilátoru a rozviřován do prostoru.
- odběrové hadičky pro měření koncentrace plynovzdušné směsi byly instalovány v cca 1/3 a 2/3 výšky místnosti se zajištěním kontinuálního nuceného odběru,
- pro překrytí ventilačních otvorů byla použita PE fólie ve dvou vrstvách na dřevěných rámech (výjimkou byly ocelové žaluzie), veškeré netěsnosti ve zdivu a technologických prostupech byly utěsněny montážní pěnou,
- místnosti, které souvisely s výbuchovým dějem a měřením tlakových projevů, byly prázdné,
- iniciační zdroj tvořila dvojice elektrických palníků typu SO Anti, umístěná u zdi _ místnosti.

Z preventivního hlediska požární bezpečnosti okolních porostů byla zajištěna přítomnost místní jednotky hasičů, včetně zásahové techniky.

Výsledky této experimentální části jsou presentovány v Tabulce 3.

Zkoušky č. 1 a 2 v místnosti I. z hlediska dispoziční geometrie představují klasický ventilovaný výbuch. V oknech místnosti jsou stavebně zabudovány skleněné luxfery a ventilační otvor dveří byl překrytý zdvojenou PE fólii. Záznamy tlakových projevů obsahují Grafy 4 a 5. Při první zkoušce s menší koncentrací metanu (7%) dokázal ventilační otvor ochránit stavební konstrukci místnosti ("patnáctka" cihlová zeď s omítkou) a došlo

k odlehčení prvního i druhého tlakového maxima s projevy drobných trhlin. Při zkoušce č. 2 s vyšší koncentrací metanu (8-9%) byl zaznamenán na všech vnitřních tlakových čidlech vyšší tlak *p*₁ a při rozšíření ventilačního otvoru částečnou demolicí dveřní zdi druhé tlakové maximum už nedosáhlo hodnot první zkoušky (zeď místnosti již byla narušena). Situaci poškození objektu přibližují Obr. 6 (zeď u dveří) a Obr. 7 (protilehlá zeď). **Tabulka 3**

Hoo	Hodnoty maximálních tlaků při deflagraci metanovzdušné směsi v objektu														
	ZM	CH₄ I obj.	Tlaková čidla / tlaky [kPa]											+	
ČZ			T1		T2		T3		T4		T5*		T6*		l [e]
		[%]	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	[9]
1	Ι.	7	2,56	4,07	2,16	3,72	2,20	3,30	2,50	3,83	1,33	*	0,20	*	1,0
2	Ι.	8-9	3,02	3,29	2,95	2,90	3,03	2,73	3,00	3,15	1,49	*	0,21	*	1,0
		T8 T8			T9		T10		T11**		T12**				
			p 1	p ₂	p 1	p ₂	p₁	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	
3	11.	8-9	4,07	***	4,61	***	4,69	***	3,73	***	1,29	***	4,57	***	0,8
5	11.	7-8	0,40	1,05	0,39	0,86	0,42	0,88	0,34	0,75	0,21	0,45	0,24	1,14	1,0
		T12		T13 T14		T14	T15		T16*		T17**				
			p 1	p ₂	p ₁	p ₂	p ₁	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	p 1	p ₂	
6		8-9	2,47	3,77	2,44	3,77	2,30	2,98	2,44	3,79	2,22	3,18	0,75	1,00	1,2

Legenda: ČZ – číslo zkoušky

ZM – zaplynovaná místnost

t⁺ - doba přetlakové fáze (zaokrouhleno)

Poznámka: * čidla mino zaplynovanou místnost v oblasti volných prostor

** čidla mino zaplynovanou místnost, ale v oblasti ohraničeného výbuchového děje

*** zaznamenáno pouze jedno tlakové maximum

Zkoušky č. 3 a 5 v místnosti II. jsou z hlediska vstupní stavební dispozice rozdílné a je zapotřebí je interpretovat zvlášť; další vnitřní geometrické uspořádání budovy zůstává zachováno, plochy otvorů jsou 8,88 m² směrem ven a 15,0 m² směrem dovnitř budovy.

Při zkoušce č. 3 byla okna vnějších otvorů kryta stavebně zabudovanými ocelovými žaluziemi (Obr. 8) a plochy vnitřních otvorů pouze omezily zaplynovaný prostor. Ve vnitřním prostoru budovy mezi místnostmi II. a III. došlo k urychlení výbuchového děje turbulizací v otvorech a pilířích mezistěn a vytržení ocelových žaluzií (Obr. 9) odlehčilo výbuchový tlak bez jeho dalšího nárůstu společně s projevem destrukční rohové trhliny dle Obr. 10 (vnější pohled) a Obr. 11 (pohled zevnitř). Ventilační otvory byly kryty "těžkými" ventily a z hlediska výbuchového děje bylo zaznamenáno pouze jedno tlakové maximum (Graf 6).

Při zkoušce č. 5, kdy ventilační otvory byly překryty pouze PE fóliemi v dřevěných rámech, jsou zachycena opět dvě tlaková maxima (Graf 7) s odventilováním tlaků. Při velikosti ventilačních otvorů a charakteru jejich překrytí, včetně snížení koncentrace metanu, tomu odpovídá i poměrně značné snížení naměřených tlakových maxim.

Při zkoušce č. 6 v místnosti III. (podle situace Obr. 3 a Obr. 5) byla naměřena opět dvě tlaková maxima (Graf 8) a přes velikost ventilačních otvorů bylo dosaženo značných tlakových projevů s relativně menším ventilačním efektem (projevuje se i vliv geometrické dispozice vnitřní zdi – viz tlakové čidlo 16), které vytvořily rohovou destrukční trhlinu dle Obr. 12 a Obr. 13 s posunem zdi přesahující 20 cm v její vrchní části.

Závěrem je zapotřebí připomenout, že výbuchové procesy metanovzdušných směsí (při vnitřním výbuchu) jsou ve stavebních objektech velmi závislé na prostorovém dispozičním řešení, ale základní projevy ventilovaných výbuchových dějů je možno konkrétně interpretovat. V našem případě se jednalo o stavební objekt více než 30 let starý a

v posledním období neudržovaný, který by v žádném případě nebyl prorovnatelný se současně platnou ČSN EN 1991-1-7 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení.

Literatura:

- [1] ZDEBSKI, J.: *Vliv turbulizačních prvků na procesy hoření metanových vrstev.* 11. mezinárodní seminář Bezpečnost v průmyslu, Malenovice, 2012
- [2] JANOVSKÝ, B.: Použití tabelovaných hodnot vlastností pevných a plynných výbušin pro odhad zatížení. Vzdělávací seminář – pilotní kurs projektu "Protivýbuchová ochrana staveb" - Odezva stavebních konstrukcí při zatížení výbuchem a jejich ochrana. ČVÚT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-03991-5
- [3] CUBBAGE, P.A., Simmonds, W.A.: An investigation of explosion reliefs for industrial drying ovens – I Top reliefs in box ovens. Trans. Inst. Gas Eng., 105, 470, 1955
- [4] CUBBAGE, P.A., Simmonds, W.A.: An investigation of explosion reliefs for industrial drying ovens – II Back reliefs in box ovens. Trans. Inst. Gas Eng., 107 1957
- [5] Janovský, B., Šelešovský, P., Horkel, J., Vejs,L.: Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and AutoReaGas simulation. Loss Prevention in The Process Industries, 19, pp. 280 – 287, 2006
- [6] ČSN EN 1991-1-7 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí Část 1-7: Obecná zatížení Mimořádná zatížení



Obr. 1 Osazení malé zkušební komory měřicími prvky



Obr. 2 Schematické uspořádání velké zkušební komory



Obr. 3 Půdorys zkoušené části objektu



Obr. 4 Budova bývalého ohřevu vtažných větrů



Obr. 5 Osazení objektu tlakovými čidly pro zaplynování místností I., II. a III.



Obr. 6 Stěna u dveří



Obr. 7 Stěna protilehlá dveřím





Graf 8



Zkouška 5

1,5

1,3 1,1











Obr. 8 Ocelové žaluzie oken



Obr. 9 Stav po destrukci žaluzií



Obr. 10 Trhlina (vnější pohled)



Obr.12 Trhlina a posuv zdi (vnitřní pohled)



Obr.11 Trhlina (vnitřní pohled)



Obr.13 Trhlina a posuv zdi (vnější pohled)