

Petra JELÍNKOVÁ¹, Aleš BERNATÍK², Oldřich SUCHARDA³

MODELOVÁNÍ EXPLOZE NEBEZPEČNÝCH LÁTEK

EXPLOSION MODELLING OF HAZARDOUS SUBSTANCES

Abstrakt

Článek se zabývá oblastí managementu rizik, který tvoří pilíř integrovaného manažerského systému. Zaměřuje se do oblasti mimořádných situací, jako je vznik požáru a výbuchu způsobený únikem chemických látek, které vykazují nebezpečné vlastnosti. V oblasti teoretické se diskutují možnosti modelování a následné posuzování těchto mimořádných událostí. Součástí je i konkrétní případová studie úniku vodíku z potrubí a potenciálních dopadů na osoby a stavební konstrukce.

Abstract

The article deals with a sphere of a risk management which creates an element of the integrated management system. It focuses on extraordinary situations such as a fire and an explosion creation which are caused by chemical substances' releases which have hazardous properties. In theoretical part possibilities of a modelling and an assessment of these extraordinary situations are discussed. The part and parcel is a concrete study of hydrogen releases from pipeline and potential consequences to people and building structures.

1 ÚVOD

V průmyslových oblastech se můžeme setkat s celou řadou průmyslových látek, které jsou nezbytné pro výrobu, ale zároveň jsou potenciálním zdrojem havárie, např. exploze. Typickým regionem s vysokou koncentrací průmyslu může být Moravskoslezský kraj. Nalezneme zde chemický, hutní a strojírenský průmysl. Mezi nejrozšířenější nebezpečné průmyslové látky z pohledu požáru a výbuchu, které se používají při průmyslové výrobě jsou plyny jako např. kyslík, vodík, zemní plyn, acetylen. Dalším nebezpečným zdrojem mohou být odpadní hutní plyny jako např. koksárenský plyn vznikající při výrobě koksu.

Základní požadavky na provedení opatření pro eliminaci rizik spojených s havárií stanovuje legislativa. Základní legislativní požadavky jsou vydávány nejčastěji formou zákona a jeho prováděcích předpisů, které stanovují opatření, nejčastěji vymezení ochranných zón, implementace opatření do havarijních plánů, krizových plánů apod. Pro získání parametrů exploze se využívá modelování exploze jako součást analýzy rizik zahrnující pravděpodobné scénáře explozí [5].

Možností, jak zkoumat exploze je modelováním. Základní typy modelů lze rozdělit do následujících skupin:

- nomogramy,

¹ Ing. Petra Jelínková, Katedra bezpečnostního managementu, Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: petra.jelinkova.st2@vsb.cz.

² doc. Dr. Ing. Aleš Bernatík, Katedra bezpečnostního managementu, Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, e-mail: ales.bernatik@vsb.cz.

³ Ing. Oldřich Sucharda, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST), Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: oldrich.sucharda@vsb.cz.

- aplikace analogicky odvozených zjednodušených teoretických modelů,
- počítačové simulace,
- simulace výbuchu v reálných podmínkách pomocí předem připravených postupů.

2 MODELOVÁNÍ HAVÁRIÍ

Nejjednodušší formou simulace exploze je výpočet s využitím nomogramu. Jedná se o kombinaci grafické a výpočetní metody. Výpočetní náročnost není velká, ale existuje celá řada faktorů, které nemohou být zahrnuty ve výpočtu. Tyto faktory mohou způsobit velkou odchylku od skutečného průběhu exploze. S postupem se nejčastěji setkáváme v normách, jak v rámci českých, tak i v legislativě EU. Normy obsahují i postup výpočtu. K nejčastějším omezením patří řešení exploze pouze v určité oblasti, dále je omezeno množství vstupních parametrů. Na základě tohoto postupu se obdrží pouze limitované výsledky.

Další metodou je aplikace analogicky odvozených zjednodušených teoretických modelů. Metoda vyžaduje při výpočtu teoretickou rozvahu a odvození vzorců. Řešitel musí hledat v teoretických zdrojích informací, jak nejlépe charakterizovat chemické látky a parametry exploze pro daný teoretický model. Možnosti parametrizace vstupu a výstupu určuje volba výpočetního modelu exploze. Ruční výpočet je časově náročný, a proto je doporučeno použít algoritmus s využitím např. tabulkového procesoru.

Třetí metodou je využití modelování exploze počítačovými simulacemi, kdy je v současné době s možností výpočetní techniky nejzajímavější. Výpočetní systémy pro modelování explozí zahrnují podrobně zpracované výpočetní modely explozí. Zpracované výpočetní modely explozí nejznámějších software (např. ALOHA, EFFECTSPLUS a TEREX) umožňují širší řadu vstupních aplikací než metody předešlé. Při vyhodnocování nabízí použití také různých klasifikačních a hodnotících kritérií pro hodnocení dopadů na zdraví a životy lidí. Aplikaci je možno použít k posouzení možných ztrát na majetku a životním prostředí [5], což může být zajímavý údaj, jak pro provozovatele takového zařízení, tak i pro průmyslové pojišťovny a orgány státní správy.

Poslední možností je simulace výbuchu v reálných podmínkách s omezením množství výbušné látky, kdy je použito při zkoumání výbuchů technologických postupů, tak aby nedošlo k újmě na zdraví osob a majetku. Jako příklad lze uvést činnost zkušebních ústavů, kdy se vyvolává a zkoumá exploze ve zkušebních štolách po důlní činnosti.

3 VÝBUCH V OTEVŘENÉM A UZAVŘENÉM PROSTORU

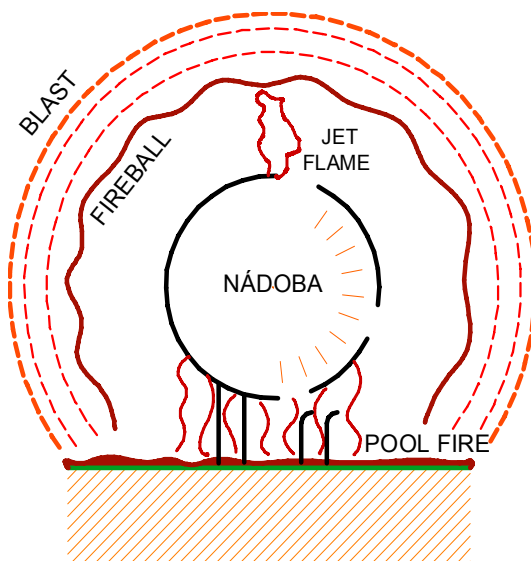
Výbuch je mimořádná událost, fyzikálně – chemický jev, kdy dochází k uvolnění množství energie do okolních prostorů spolu se šířením tlakové vlny a doprovázené lokálním zvýšením tlaku a teploty [2]. Jedná se o rychlé hoření, kdy koncentrace plynu s oxidační látkou je v rozsahu mezi mezemi výbušnosti. Existují různé typy možných výbuchů v závislosti na hořlavé nebo výbušné látce. Jiným způsobem reagují kapaliny, plyny, zkapalněné plyny, prachy, výbušniny. Základními podmínkami pro vznik výbušné reakce je vedle přítomnosti těchto látek, přítomnost oxidačního prostředí, zápalného zdroje a prostoru, ve kterém se bude výbuch šířit.

Mezi základní typy výbuchů hořlavých kapalin, plynů nebo par lze zařadit následující [3]:

- Boiling liquid expanding vapors explosion (B.L.E.V.E),
- Vapour cloud explosion (V.C.E).

Prvním typem výbuchu je tzv. B.L.E.V.E., jehož zkratka pochází od anglického slova „Boiling liquid expanding vapour explosion“. Jedná se o výbuch expandujících par přehřáté kapaliny, nejčastěji zkapalněných uhlovodíkových plynů (např. LPG, LNG apod.). Obecně lze říci, že tento jev nastává, když dojde k náhlému uvolnění velkého množství výše zmíněných látek do atmosféry. Jako primární příčina vzniku tohoto výbuchu je oheň v okolí nádoby, který postupně oslabí plášť nádoby až dojde k jeho prasknutí. V tomto okamžiku se veškerý objem této nádoby uvolní do okolních prostorů. Exploze je doprovázena vznikem tlakové vlny a tvorbou úlomků. V případě úniku hořlavé

kapaliny nebo zkapalněného uhlovodíkového plynu může vzniknout ohnivá koule (fire ball) [2]. Princip tohoto jevu je zobrazen na obr. 1



Obr. 1: Princip B.L.E.V.E.

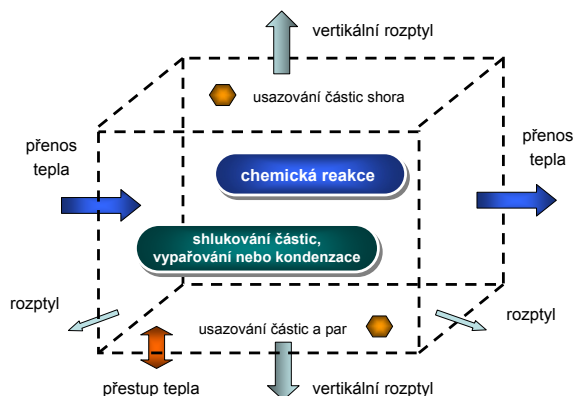
Druhým typem jsou výbuchy hořlavých mraků par známé pod označením v anglickém jazyce "Vapour cloud explosion, V.C.E". Tento typ výbuchu může způsobit nejzávažnější možné následky. V historii je dokumentována řada případů tohoto výbuchu, kdy vlivem úniku chemické látky došlo k vzniku jevu V.C.E., které dokazují účinky tohoto výbuchu. Zejména jde o výsledky působení na okolní konstrukce stavebních objektů, životní prostředí a v neposlední řadě na člověka. Je možné jmenovat závažné havárie ve Flixborough v roce 1974, kdy při úniku a následném výbuchu cyklohexanu došlo k usmrcení 28 osob. Další havárie z roku 1989 byl výbuch zemního plynu v Rusku, při němž bylo usmrceno 1218 osob a 575 osob bylo zraněno. Poměrně známá je i havárie z Pasadeny, rovněž z roku 1989, kdy v podniku na výrobu polyethylenu došlo k chybě při údržbě a nastalo uvolnění směsi plynu ethylenu, izobutanu, hexenu a vodíku z kulového ventilu. Celkové uvolněné množství bylo zhruba 38 650 kg. Následoval prudký výbuch mračna par. Řetězově exploze způsobila dvě další exploze skladovacích nádrží izobutanu o obsahu zhruba 76 m³ a reaktoru s polyethylenem. Časové rozmezí bylo asi od 10 - 15 do 25 - 45 minut po tom, kdy nastal první výbuch. Postupně docházelo ke vzniku dalších požárů a výbuchů. Ve vzdálenosti 6 milí byly ještě nalézány úlomky. Důsledkem této havárie byla dvě zcela zničená zařízení, 23 usmrcených osob a mnoho zraněných lidí [3].

Podmínky pro vznik jevu V.C.E jsou následující [1]:

- přítomnost hořlavých látek za odpovídajícího tlaku nebo teploty,
- mrak par musí být vytvořen před zapálením,
- část mraku musí být v mezích výbušnosti dané látky,
- tlaková vlna způsobená výbuchem tohoto typu je závislá na rychlosti šíření plamene.

Výbuch mračna par je přeměna hořlavých plynů nebo par ve směsi s oxidačním prostředkem, která je doprovázena tlakovou vlnou. Mohou nastat dvě situace [3]. Pokud nedojde ke vzniku přetlaku vznikne požár typu Flash Fire, při kterém nedochází ke vzniku tlakové vlny. Pokud přetlak nastane, pak se jedná o V.C.E. Při tomto typu výbuchů již vzniká tlaková vlna. Obvykle nastává detonace, kde plamen postupuje jako rázová vlna následována těsně vlnou, která uvolňuje energii na udržení rázové vlny. Hořlavý soubor hoří nadzvukovou rychlostí. Jako důsledek může nastat zhroutil stavby a konstrukčních systémů.

Charakter tohoto jevu je uveden na obr. 2.



Obr.2: Princip V.C.E.

Ve výše uvedených odstavcích jsou objasněny základní principy vzniku výbuchu mračna hořlavých par. Podstatné je rovněž objasnit možné dopady těchto jevů. Tabulky níže uvedené zobrazují působení tlaku vznikajícího při výbuchu na osoby a stavební konstrukce.

Tab.1: Účinky výbuchu na osoby a stavební konstrukce [3, 4].

Přetlak [bar]	Pravděpodobnost úmrtí osob [%]	Účinek na stavební konstrukce
<0,07	0	Vyražená okna a dveře
0,07 – 0,21	10	Budovy dočasně neobyvatelné
0,21 – 0,34	25	Budovy těžce poškozené (zničené z 50%)
0,34 – 0,48	70	Budovy takřka zničené (zničené ze 75%)
>0,48	95	Zlomené stožáry, lámání kmenů stromů a silných větví

Na typ výbuchu V.C.E. je zaměřen příklad následující případové studie.

4 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Pro případovou studii analýzy rizik je zvolen případ havárie průmyslové látky vodíku ve venkovním a vnitřním prostoru. Tato testovací studie je provedena v průmyslovém podniku zabývajícím se výrobou vodíku a dalšími chemickými produkty.

Základní algoritmus při analýze rizik je definování možných skupin scénářů, které mohou nastat. Pro analýzu rizik jsou vybrány dva scénáře, roztržení potrubí v plném průřezu a následný požár typu Jet Fire a jev V.C.E, jehož vysvětlení je uvedeno v minulé kapitole. Požár typu Jet Fire nastává v zařízeních pod vysokým tlakem (např. produktovody). Při úniku hořlavé kapaliny z potrubí za vysokého tlaku dochází buď k rozstříkávání nebo k úniku proudem. Tyto požáry mohou být velmi intenzivní, ohrožují okolí vlivem sálavého tepla, mohou působit na zařízení a způsobit poškození vedoucí k ještě větším únikům [2]. Vstupní parametry pro počítačovou simulaci výbuchu s uvažováním jevu Jet Fire a výbuchu typu V.C.E jsou shrnuty v tab. 2.

Tab.2: Vstupní podmínky.

Scénář	Rychlost větru	Třída atmosférické stability	Typ úniku látky z potrubí	Typ úniku
1.	5 m.s ⁻¹	D	Jet fire	Katastrofický *
2.	1,7 m.s ⁻¹	F	Jet fire	Katastrofický *
3.	5 m.s ⁻¹	D	V. C. E.	Katastrofický*
4.	1,7 m.s ⁻¹	F	V. C. E.	Katastrofický*

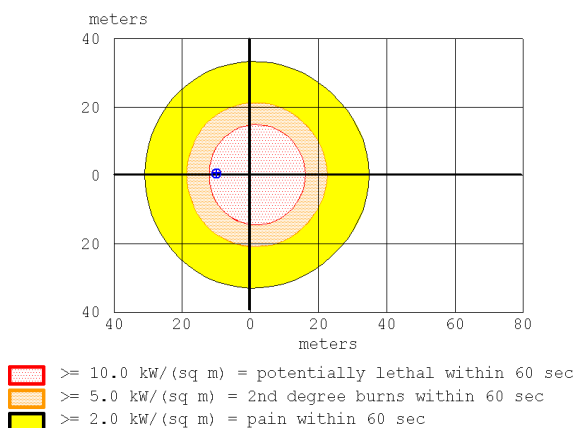
*celým průměrem

Výsledky provedených simulací explozí shrnuje tab. 3, obr. 3, obr. 4 a obr. 5.

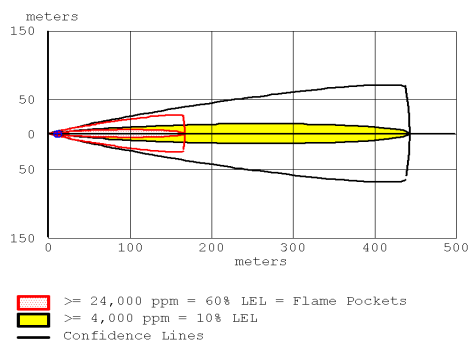
Je simulováno potrubí o délce 2 km, průměru 250 mm, vstupním tlaku 5 bar a teplotě 20 °C.

Tab.3: Výsledné hodnoty po provedené počítačové simulaci.

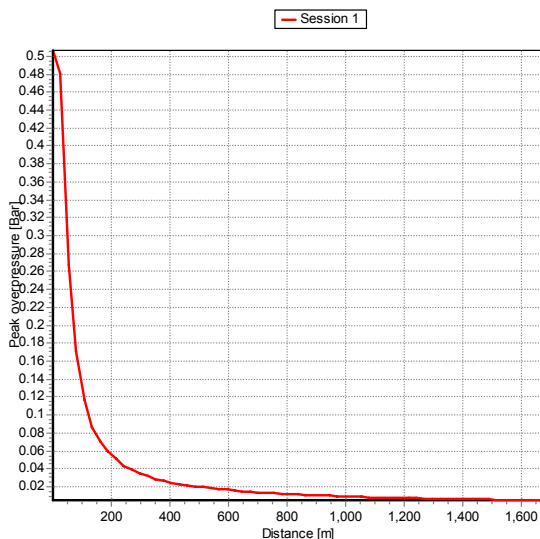
Scénář	Maximální délka plamene (burn duration 1 hour)	Maximální poměr odhořelé látky v čase	Celkové odhořelé množství	Průměrné uvolněné množství v čase	Smrtelná zóna	Ohrožení v bodě (v 10 m)
1.	7 m	741 kg.min ⁻¹	5 199 kg	—	16 m	12,5 kW.m ⁻²
2.	7 m	741 kg.min ⁻¹	5 199 kg	—	15 m	15,6 kW.m ⁻²
3.	—	—	5 199 kg	90,9 kg. min ⁻¹	168 m	119 000 ppm
4.	—	—	5 199 kg	90,9 kg. min ⁻¹	443 m	41,9 ppm



Obr.3: Zóna ohrožení pro scénář č. 1.



Obr.4: Zóna ohrožení pro scénář č. 3.



Obr.5: Vývoj přetlaku při explozi.

Působící přetlak na konstrukce je 0,129 bar, což způsobuje malé škody na budovách, jsou nutné pouze opravy malého rozsahu, budovy jsou dočasně neobyvatelné.

ZÁVĚR

V současné době je management rizik jeden z nejdůležitějších prvků ve strategii podniků. V průmyslových společnostech, kde se užívá hořlavých látek k technologickým procesům je vysoký rizikový faktor požáru a výbuchu. Článek se zabývá oblastí risk managementu a ukazuje na možnosti řešení teoretické prevence rizik před škodami na majetku a lidských životech formou modelování. Nejvyšší riziko škod způsobených explozí lze zejména nalézt v chemickém, hutním a v dalších odvětvích průmyslu. Nedílnou součástí rizikového managementu je stanovování a provedení opatření s cílem snižování působících rizik. Jednou z možných cest ukazuje i případová studie v tomto článku. Provedení správného managementu rizik má také podstatný vliv na průmyslové pojištění (strategický management, spolupráce top managementu, konzultantských firem, pojišťovacích společností).

Součástí předloženého článku je případová studie potrubí vodíku v průmyslovém areálu. Riziko exploze je modelováno pomocí výpočetních simulací. Rizikem v případě vodíku je jeho nekontrolovatelné hoření při jeho náhodném úniku, jak ve vnitřním tak i venkovním prostředí. Vysoká pravděpodobnost úniku vodíku, vzhledem k jeho vlastnostem, a následně tvorba hořlavé směsi může vést při iniciaci k uvolnění velké energie a následně k hoření nebo k explozi.

Praktickým závěrem je stanovení účinku výbuchu co do stanovení okruhu smrtelných zranění a ohrožení tepelným zatížením, či koncentrací použité látky v bodě 10 m od epicentra výbuchu. Největším rizikem při vzniku exploze uvnitř zařízení je tlaková vlna a požární zatížení objektu. V případě výbuchu vně objektu je největším ohrožením na lidské zdraví koncentrace nebezpečné látky nebo následných spalin v ovzduší.

LITERATURA

- [1] *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*, "Yellow Book", 3 ed., PR 14E, 1997
- [2] BARTLOVÁ I., DAMEC J. *Prevence technologických zařízení*. Ostrava: SPBI, Edice spektrum 30., 2002
- [3] *Lees' Loss Prevention in the Process Industries, hazard identification, assessment and control*. 3. ed. Elsevier: Edited by Sam Mannan, 2005, ISBN 0-7506-7555-1
- [4] URL:< <http://www.rmrisk.ch/> > [cit. 1. 10. 2009]
- [5] JELÍNKOVÁ P., BERNATÍK A., SUCHARDA O. *Risk analysis, computational simulation of accident and its influence to surround*, The First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering , B.H.V. Topping and M. Papadrakakis, (Editors), Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Jaroslav Bartoš, Ph.D., ArcelorMittal Ostrava, a.s., podnikový revizní technik.