

Kde  $I_{X_i}$  - je intenzita tepelnej radiácie prijatá osobami, ktoré sú spočiatku vo vzdialenosti  $x$  od centra tepelného toku - plameňa - fireballu. Vzťah 2 - predpokladá, že intenzita tepelnej radiácie zo vzdialenosti dostatočne veľkej od plameňa sa riadi modelom bodového zdroja, vyjadrené vzťahom

$$I_{X_i} = K/x_i^2 \quad 3.$$

Kde  $K$  je závislé od typu závažnosti a charakteru havárie

$x_i$  - hranica - vzdialenosť s vymedzenou hodnotou dávky tepelného toku -  $m$ ,

$t_r$  - reakčný čas osoby. Hymes [15] ustanovil, že keď plameň začína pôsobiť z miesta jeho vzniku, ubehne doba 5 sekúnd pokiaľ osoba naň zareaguje,

$u$  - rýchlosť úniku osoby. TNO [14] postavili túto rýchlosť na priemernej hodnote  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Obecne je hodnotená táto hodnota ako príliš veľká pre skupinu mladistvých ľudí a starých ľudí alebo ľudí fyzicky hendikepovaných,

$t_{\text{exp.}}$  - expozičná doba, ktorá zahŕňa reakčný čas a rýchlosť úniku exponovaných osôb -  $s$ .

Vzťah 2 môže byť upravený, preto aby presne určil izočiary nebezpečenstva v súlade s nasledovnými kritériami:

1) ak ide o rozsiahly požiar, vzťah 2 je možné použiť pokiaľ osoba dosiahne bezpečnú zónu:  $x = x_{1.7}$ , kde  $I = 1.7 \text{ kW/m}^2$ .

Pre tieto podmienky dostávame nasledovné :

$$t_{\text{exp.}} - t_r = x_{1.7} - x_i / u \quad 4.$$

Zámenou  $I_{X_i}$  a  $t_{\text{exp.}} - t_r$  vo vzťahu 2 so vzťahom 3 resp. 4 a použitím citovaných hodnôt  $t_r = 5 \text{ s}$  a  $u = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dostaneme :

$$D_T = K^{4/3} / x_i^{8/3} [ 5 + 3x_i/20 \{ 1 - (x_{1.7} / x_i)^{-5/3} \} ] \quad 5.$$

2) ak je plameň krátky napr.: fireball, čas expozície definovaný vzťahom 4, môže byť dlhší ako trvanie plameňa  $t_d$ . Potom  $t_{\text{exp.}} = t_d$  a vzťah 2 môže byť vyjadrený v nasledovnom tvare :

$$D_T = K^{4/3} / x_i^{8/3} [ 5 + 3x_i/20 \{ 1 - (1 + 4/x_i (t_d - 5))^{-5/3} \} ] \quad 6.$$

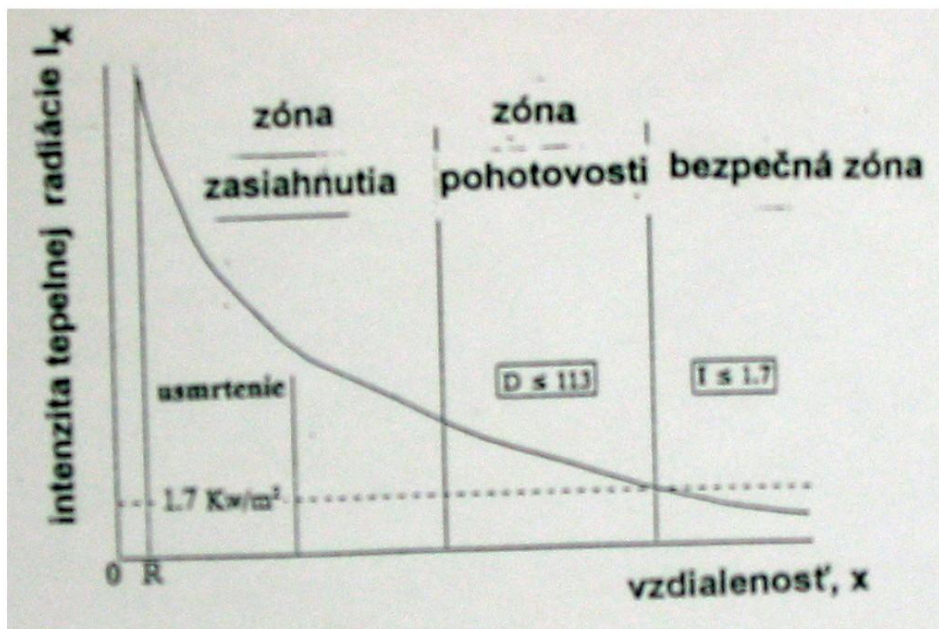
Pri použití hodnoty dávky intenzity tepelného toku pre prvý stupeň popálenia  $D_{TI} = 113 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot s$  a druhý stupeň popálenia  $D_{TII} = 246 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot s$  vo vzťahu 5 alebo 6, môžu byť určené hodnoty  $x_j$ , ktoré ohraničujú možné rizikové územia.

Na základe vyššie uvedených úvah môžeme navrhnúť stanovenie - projektovanie zón :

**1) Bezpečná zóna :** toto je oblasť v ktorej je najvyššia intenzita tepelnej radiácie  $1.7 \text{ kW/m}^2$ . Oblasť môže byť považovaná za bezpečnú pre dlhé časové obdobie a neexistujú tu žiadne špeciálne požiadavky.

**2) Zóna dynamického stavu pohotovosti :** táto je ohraničená na jednej strane dávkovou izočiарou získanou zo vzťahu 5 alebo 6 čo zodpovedá popáleninám prvého stupňa, a na druhej strane "Bezpečnou zónou".

**3) Zóna zasiahnutia :** táto odpovedá najbližšej zóne k plameňu a je ohraničená zónou dynamického stavu pohotovosti. Niekoľko rizikových izolíní môže byť stanovených v rámci tejto oblasti za použitia vzťahu 5 alebo 6 a pri aplikácii požadovaných hodnôt dávok intenzity tepelného toku  $D_T$ .



Obr. č. 5 Znárodnenie projektovania zón pre plošný plameň - plameň kaluže ako príklad. R - polomer kaluže - usmrtenie.

V spracovanej metodickéj príručke : "Metodická príručka pre zaraďovanie rizikových podnikov s podprahovými množstvami vybraných nebezpečných látok a pre predbežný odhad rizík v podnikoch podliehajúcich režimu zákona o závažných priemyselných haváriách, november 2001" sme charakterizovali ako zdroj tepelného toku fireball - ohnivá guľa, ktorá je dôsledok vzniku reprezentatívneho havarijného scenára typu BLEVE ( Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion - výbuch pár vriacej kvapaliny ). Boli uvedené príklady výpočtov parametrov uvedeného reprezentatívneho havarijného scenára. Ide o riešenie náročného problému tepelných účinkov nežiadúcich reakčných premien zmesí horľavých kvapalín, plynov a pár so vzduchom v stave spravidla po tepelnej expozícii skladovacieho zásobníka. Pravdepodobnosť vzniku BLEVE je v súčasnosti zaraďovaná pred havarijný stav, ktorý vznikne po rozptyle uniknutého plynného média ( UVCE efekt - Unconfined Vapor Cloud Explosion - výbuch pár neohraničeného plynného oblaku ).

Tento proces je možné charakterizovať postupnosťou nasledovných identifikačných znakov :

- nahrievanie zásobníka vyhorevaním horľavej kvapaliny, pary ktorej tvoria so vzduchom výbušnú, alebo horľavú zmes,
- v zásobníku s teplotou stúpa tlak pár, ktoré sú v určitom medznom stav uvoľnené trhlinou - otvorom v plášti zásobníka,
- dochádza k uvoľneniu prehriatych pár spolu s vriacou kvapalnou fázou v typickom guľovom tvare na povrchu ktorého nastáva prudké vyhorevanie zmesi pár kvapaliny so vzduchom ( fireball - FB) s typicky zápornou kyslíkovou bilanciou ( intenzívne uvoľňovanie sadzí),

- vyššie popísaný stav môže byť dosiahnutý spravidla dejom vonkajšej tepelnej expozície zásobníka až do stavu jeho zborlenia,
  - doba života FB je závislá od média, ktoré sa v tepelne exponovanom zásobníku nachádza, hmotnosti obsahu v zásobníku, a množstva média, ktoré sa uvoľní v okamihu vzniku únikového otvoru,
  - spravidla tlaková vlna je výrazne slabá, nedosahuje ani hodnôt slabej deflagračnej formy reakčnej premeny,
  - výrazný je tepelný radiálny tok, ktorého tepelný dosah má dominantné postavenie u tohoto druhu nežiadúcej reakčnej premeny,
  - v počiatočnej fáze vzniku BLEVE efektu je významná iniciačná hemisferická rozťažnosť uvoľnených pár a sčasti aj kvapalnej fázy, pričom táto fáza rozťažnosti je krátka a efekt "výtlaku" spôsobuje formovanie sférického tvaru uvoľnenej skladovanej horľavej - výbušnej látky,
  - v prípadoch, kedy je zásobník naplnený kvapalnou fázou, výraznou tepelnou expozíciou nastáva jeho deštrukcia meraná po uplynutí desiatok minút ( v závislosti na intenzite požiaru - tepelnej expozícii zásobníka, pracovných podmienkach a druhu skladovaného média ), pričom spravidla dochádza k "otvoreniu" časti zásobníka na rozhraní vriacej kvapaliny - plynnej a parnej fázy, časť kde sa nachádza vriaca kvapalina je deformovaná vzniknutým podtlakom po uniknutej vriacej kvapalnej a parnej fáze vo forme fireballu,
- vyššie popísaný dej môže byť realizovaný aj reakčným teplom dvoch, alebo viacerých kvapalín, ktoré generujú výrazné hodnoty zlučovacieho tepla po ich vzájomnom zmiešaní v zásobníku resp. reakčnej nádobe,**
- typicky "hríbový tvar" fireballu počiatočného štádia vývoja BLEVE efektu v rozpore s názvom (explosion - výbuch) produkuje silnú tepelnú radiáciu, pričom energia je uvoľňovaná v rádovo v desiatkach sekúnd v závislosti od množstva uvoľnených pár a vriacej kvapaliny.

Na prognózu vzniku BLEVE efektu a analýzu samotného deja, ako aj tvorbu metodického postupu, sme použili dostupné hodnotiace matematické modely. Vzhľadom na pomerne veľký výskyt hodnôt "a,b,c,d" v literárnych prameňoch [ 16 ] prezentujeme ich hodnoty.

Pre priemer fireballu - ohnivej gule  $D_{FB}$  ( FB ) a dobu jeho života  $t_{FB}$  ( čas trvania ) sú definované nasledovné obecné vzťahy :

$$D_{FB} = a * M^b \quad [ m ] \quad \text{priemer FB}$$

$$t_{FB} = c * M^d \quad [ s ] \quad \text{doba života FB}$$

M - je hmotnosť látky v zásobníku ( napr.: skvapalnený propán LPG ) v kg.

Hodnoty "a,b,c,d" sa menia podľa použitého modelu, pričom ich použitím môžu vzniknúť významné rozdiely v hodnotiacich parametroch FB. V tabuľke 2 uvádzame sumárny prehľad modelov a v nich použitých hodnôt "a,b,c,d".

Tabuľka 2 : Sumárny prehľad hodnotiacich modelov BLEVE a hodnoty "a,b,c,d"  
[ 17 ].

Model - autor č.	hodnoty "a,b,c,d"			
	priemer FB		doba života FB	
	a	b	c	d
1. Gayle 1	3,68	0,326	0,245	0,356
2. Gayle 2	6,14	0,325	0,410	0,340
3. Brasie	3,80	0,333	0,300	0,333
4. Marshall	5,50	0,333	0,380	0,333
5. Roberts	5,80	0,333	0,450	0,333
6. SRD	6,00	0,333	0,005	.....
7. Fay Lewis	6,36	0,333	2,570	0,167
8. Hardee	6,24	0,333	1,110	0,167
9. Hasegawa1	5,28	0,277	1,099	0,097
10.Hasegawa2	5,25	0,314	1,070	0,181
11.Moorhouse	5,33	0,327	0,923	0,303
12.TNO	6,48	0,325	0,852	0,260
13.Maurer	3,51	0,333	0,320	0,333
14.High	6,20	0,320	0,490	0,320
15.HSCC	6,45	0,333	5,530	0,333
16.API	5,33	0,327	1,089	0,327

**vysvetlenie dostupných skratiek:**

SRD - Safety and Reability Directorate

HSCC - nepoznáme

API - American Petroleum Institute

..... hodnota nie je uvedená

Hodnoty "a,b,c,d" uvedených modelov v tabuľke 2 boli analyzované štatistickými postupmi a porovnávané s experimentálne získanými hodnotami. Výsledkom porovnania je stanovené ako najvhodnejšie použiť pre výpočet  $D_{FB}$   $t_{FB}$  - hodnoty "a,b,c,d" z Gayleho modelu 2 a TNO modelu. Z niektorých uvedených hodnôt "a,b,c,d" boli vyhotovené závislosti priemeru  $D_{FB}$  a doby života  $t_{FB}$  FB na hmotnosti M. Graf č. 4 a graf č. 5.

Za pozoruhodný moment, ktorý stojí sa povšimnutie najmä vo vzťahu pre tvorbu scenárov z titulu reprezentatívneho scenára BLEVE je fakt, že nárast tak  $D_{FB}$  ako aj  $t_{FB}$  je exponenciálny pričom nárast oboch hodnôt je aj pri relatívne malých hodnotách hmotnosti paliva značný. Tento moment sa prejaví najmä v prehustených zónach s vysokým stupňom zahradenia - záver : venovať náležitú pozornosť hodnoteniam parametrov  $D_{FB}$  a  $t_{FB}$  v prehustených technologických zónach s následným hodnotením možného rozvoja a zvyšovania havarijného stavu.

Podľa charakteristických tepelných účinkov na okolie v blízkosti havarovaných zásobníkov, tvarových deformácií zvyškov zásobníkov, ako aj odhadovanej doby života fireballu ( z výpovedí ) je možné podložiť hodnotiacimi argumentmi a hodnotiť havarijný stav za stav odpovedajúci typovému modelu BLEVE.

Na základe hodnotiaceho modelu [ CPQRA ] zhodnotíme maximálny priemer FB, dobu života t fireballu ( FB ), intenzitu tepelného žiarenia na vzdialenosť 200 m samostatného zásobníka na propán o objeme  $V_{zásob.} = 200 \text{ m}^3$  s obsahom 100 000 kg ( M ) propánu pri podmienkach teploty 20 °C a tlaku v zásobníku 0,82 MPa. Atmosferická vlhkosť odpovedá parciálnemu tlaku pár vody 2810 N/m<sup>2</sup> - vstupný parameter  $P_w$ .

[ CPQRA - Guidelines Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989 ]

$$\begin{aligned} D_{\max.} &= 6,48 \times M^{0,325} = 6,48 \times 100\,000^{0,325} = 273 \text{ m} \\ t_{\text{BLEVE}} &= 0,825 \times M^{0,26} = 0,825 \times 100\,000^{0,26} = 16,5 \text{ s} \\ H_{\text{BLEVE}} &= 0,75 \times D_{\max.} = 0,75 \times 273 = 204 \text{ m} \\ D_{\text{initial}} &= 1,3 \times D_{\max.} = 1,3 \times 273 = 354 \text{ m} \end{aligned}$$

Faktor pohľadu - vzdialenosť 200 m

$$F_{2,1} = D_{\max.}^2 / 4 r^2 = 273^2 / 4 \times 200^2 = 0,47$$

r - je vzdialenosť medzi terčom ( objektom ) na ktorý očakávame tepelné žiarenie a stredom fireballu v [ m ].

Dĺžka dráhy prenosu tepelného žiarenia - prepona X

$$X = (H_{\text{BLEVE}}^2 + V_{\text{zásob.}}^2)^{0,5} - 0,5 \times D_{\max.}$$

$$X = (204^2 + 200^2)^{0,5} - 0,5 \times 273 = 150 \text{ m}$$

Tepelná transmisivita :

$$\tau = 2,02 ( P_w \cdot X )^{-0,09}$$

$$\tau = 2,02 ( 2810 \cdot 150 )^{-0,09} = 0,63$$

Tepelné žiarenie povrchu :

$$E = F_{\text{rad.}} \cdot M \cdot H_c / \pi \cdot D_{\text{max.}}^2 \cdot t_{\text{BLEVE}}$$

$$E = 0,25 \cdot 100\,000 \cdot 46,350 / 3,14 \cdot 273^2 \cdot t_{\text{BLEVE}} = 300 \text{ kW/m}^2$$

V [ CPQRA ] je zavedený  $F_{\text{rad.}}$  - faktor, ktorý charakterizuje časť - podiel radiačného toku, pričom uvádza hodnotu  $F_{\text{rad.}} = 0,25$ .

Podľa autorov ☼ K. Satyanarayana, M. Barah a P.G. Rao : J. Loss Prev.Process Ind. Vol. 4, October, 1991 sa táto hodnota mení v rozsahu 0,13 až 0,35 a volí sa ľubovoľne. Uvedení autori uvádzajú aj ďalšie modely pre  $Q_r$ .

$H_c$  - je spalné teplo propánu [ kJ/kg ]

Prijatý tepelný tok na terč - sledovaný objekt je :

$$Q_r = \tau \cdot E \cdot F_{2,1}$$

$$Q_r = 0,63 \cdot 300 \cdot 0,47 = 89 \text{ kW/m}^2$$

Podľa vyššie uvedených autorov ☼ je uvedená hodnota prijatého tepelného toku 37,5 kW/m<sup>2</sup> dostatočná na zničenie technologického zariadenia bližšie nedefinovaného a 100 % usmrtených osôb.

Vyššie uvedené hodnotenie sme uviedli z dôvodu naznačenia prístupu v snahe hodnotiť tepelné účinky od BLEVE efektu. Postupy tohto charakteru majú celý rad priblížení a nie je možné ich považovať v súčasnosti za dostatočne presné pre rozhodovací proces.

Ak vychádzame z popisu priebehu vzniku a rozvoja fireballu potom je možné hodnotiť postupu stanovenia účinkov BLEVE nasledovne:

- odhadovať a ľubovoľne stanoviť podiel uvoľneného spálneho tepla - teda podiel zhoreného paliva z ktorého sa uvoľňuje teplo do atmosféry je významný parameter v polohe odhadu, spravidla výpočtom je vysoko nadhodnotený, alebo je podhodnotený ak to niekomu vyhovuje,
- z pohľadu stavu kvapalnej fázy vo fireballu po jeho hemisférickej rozťažnosti nastáva proces stekania kvapaliny, ktorá sa nesplyní smerom dole k zemi, rozvoj hemisférickej

rozťažnosti je v významnej miere závislý na tlaku v ktorom nastane rozvoj BLEVE - TLOC,

- tepelná transmisivita nezohľadňuje fakt tvorby významnej vrstvy dymu v tesnej blízkosti fireballu,
- je veľmi zložitú ustanoviť podmienky a štruktúru prognóz v zmysle scenárov potenciálne možných tepelných dosahov v dôsledku alternatívnych hmotností paliva M a parciálnemu tlaku pár vody v atmosfére,
- technologická realita je taká, že zásobníky sú spravidla súčasťou prehustených technologických zón s vysokým a miernym stupňom zahradenia,
- parametre BLEVE vo významnej miere závisia na hmotnosti paliva M v zásobníku, ktoré je veľmi problematické stanoviť v čase vzniku BLEVE, mení sa v závislosti na teplote, tlaku a pomeroch na rozhraní kvapalnej a plynnej fázy,
- riešenie tohto reprezentatívneho scenára spočíva v disponibilite prostriedkov pre zabránenie vzniku BLEVE pri zohľadnení prejavov, ktoré sú uvedené popisnou formou a ilustratívnymi grafickými priebehmi,
- významný a overený postup zábrany vzniku BLEVE, ktorý je aplikovaný v štátoch EÚ je uloženie zásobníkov s palivami, ktoré potenciálne môžu vytvárať BLEVE efekt do zeme ( pod úroveň zeme v betónových krytoch), čím sa významne zabráni tvorbe podmienok vzniku BLEVE. V technologických priestoroch je takáto realizácia zložitejšia.