Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti (JOSRA). JOSRA 3 - 2008, roč. 1.

Význam probit funkce pro havarijní plánování

01.12.2008

IMPORTANCE OF PROBIT FUNCTION FOR EMERGENCY PLANNING

Jan Bumba[1]

[1] Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., bumba@vubp-praha.cz

nebezpečné chemické látky | pravděpodobnost | probit funkce | expozice

Abstrakt

Chemické látky jsou neodmyslitelnou součástí života moderní průmyslové společnosti. Na jedné straně přinášejí všemožný užitek, na druhé straně disponují nebezpečnými vlastnostmi, které ohrožují zdraví a život lidí i hospodářských zvířat, způsobují škody na majetku a životním prostředí. Po krátkém přehledu norem a směrnic, týkajících se chemické expozice, je stručně nastíněna podstata analýzy probitu. Její využití při havarijním plánování je pak demonstrováno pomocí rozptylového programu ALOHA tak, aby výstupy tohoto programu, určeného jednak záchranářům jako pomůcka v průběhu protihavarijních zásahů, jednak v předstihu plánovačům havarijní připravenosti, byly využitelné k všeobecné ochraně nechráněné populace v okolí průmyslových objektů a zařízení, kde se nakládá s nebezpečnými chemickými látkami.

Klíčová slova: nebezpečné chemické látky, toxická expozice chemikáliemi, logaritmickonormální rozdělení, funkce pravděpodobnostní jednotky (probit), rozptylový program ALOHA, parametry koncentrace a času pro funkci probit

Abstrakt

Chemical substances are inherent part of modern industrial society live. On the one hand benefit all manner of profit, on the other they have dangerous properties by that they threaten the lives and health of humans and domestic animals and cause damages on the property and environment. After a short overview of norms and directives dealing with the chemical exposure there is briefly outlined a core of probit analysis. Its use at emergency planning it is demonstrated by help of the ALOHA dispersion program by a way that outputs of this program are pitched partly to rescuers as an aid during the emergency interventions and partly in advance for emergency prepardness planners with aim they would be used for general protection in a vicinity of industrial objects and facilities in which there is handled with dangerous chemical substances.

Keywords: dangerous chemicals, chemical toxic exposure, lognormal distibution, probability unit (probit), ALOHA dispersion program, concentration and time parameters for probit function

Úvod

Cílem zákona o prevenci závažných průmyslových havárií s přítomností chemických látek a přípravků [1] je snížit pravděpodobnost vzniku a omezit dopady závažných havárií na zdraví a životy lidí, na hospodářská zvířata, na majetek a životní prostředí v objektech a zařízeních a v jejich okolí.

Závažnou havárií se podle § 2, odst. e) tohoto zákona rozumí „mimořádná, částečně nebo zcela neovladatelná, časově a prostorově ohraničená událost, například závažný únik, požár nebo výbuch, která vznikla nebo jejíž vznik bezprostředně hrozí v souvislosti s užíváním objektu nebo zařízení, v němž je nebezpečná látka vyráběna, zpracovávána, používána, přepravována nebo skladována, a vedoucí k vážnému ohrožení nebo vážnému dopadu na životy a zdraví lidí, hospodářských zvířat a životní prostředí nebo k újmě na majetku“.

Pokud se týká působení toxické látky na živé organismy, jde v takovém případě obvykle o jednorázovou, akutní expozici, kdy v celkem krátké době vnikne do organismu určité množství této látky, převážně vdechováním (případný kontakt s pokožkou nebo požití ovšem vyloučen není). Proto je velmi důležité odhadnout účinek toxického rozptylu nebezpečné látky pro stanovení akutní inhalační expozice a stanovit dopad jako pravděpodobnost úmrtí zasažených organismů, v tomto případě lidí. Tím se situace liší od hodnocení toxického působení nebezpečných látek v případech, kdy se jedná o pracovní prostředí, tzn. práci s nebezpečnými látkami nebo v prostředí nebezpečných látek (kde platí hygienické limity, jako jsou PEL – přípustné expoziční limity nebo NPK – nejvyšší přípustné koncentrace aj.) nebo o limity pro havarijní a územní plánování (nebezpečné zóny, evakuační úrovně koncentrací atd.). Pro tento úkol existují různé cesty a jednou z nich je využití analýzy probit.

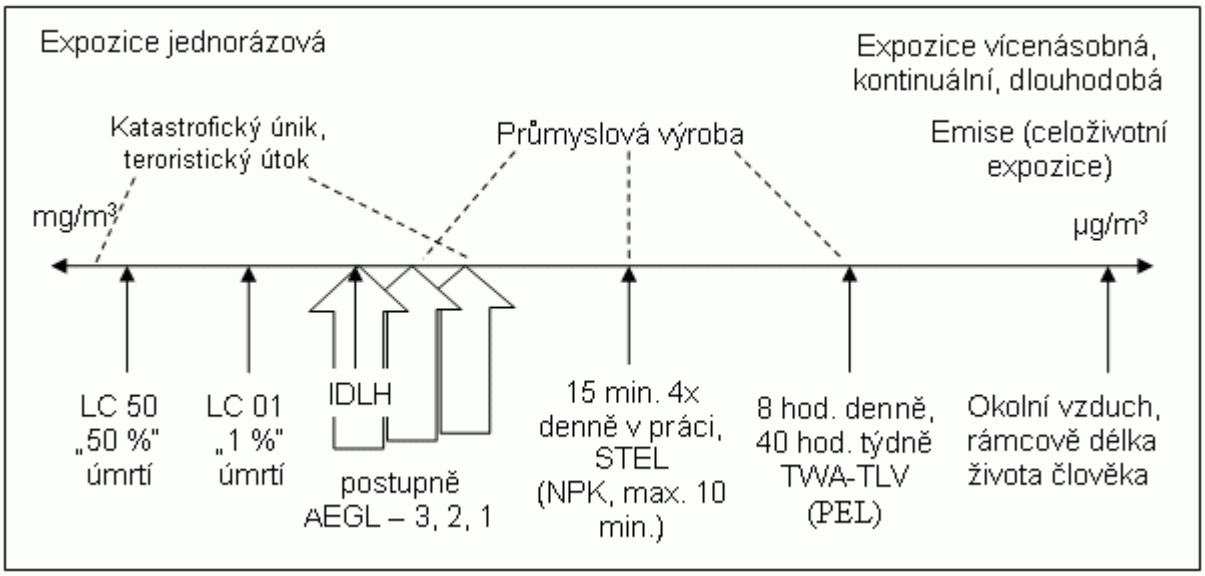
Základní fakta týkající se norem a směrnic pro chemickou expozici

Chemické látky obecně nemají jednoduchou „bezpečnou úroveň“. Každá chemikálie má vícenásobnou zdravotní koncentrační normu, mez nebo směrnici – koncentrace se mění v závislosti na době trvání a četnosti pobytu lidí v prostředí, kde se chemikálie vyskytuje a závisí též na celkové situaci, jaká úroveň rizika bude přijatelná. Různé normy a směrnice navíc platí pro různá prostředí výskytu chemikálií – jako je vzduch, voda, půda a i pro další prostředí, jako je např. potrava [2].

Zdravotnické organizace (např. OSHA/NIOSH v USA, u nás SZÚ) rozpracovaly specifické koncentrační a/nebo expoziční úrovně pro řadu použití. Při odhadu nebo prevenci zdravotních rizik spojených s chemikáliemi je důležité, aby byly pro srovnání použity ty nejvhodnější zdravotní normy a/nebo směrnice. Obr. č. 1 ukazuje obecný příklad rozsahu úrovně koncentrace představující různá kritéria. V poslední době jsou doporučovány právě pro účely ochrany populace v případě krátkodobých havarijních úniků chemických látek limity AEGL (v EU jsou v návrhu limity AETL [3]). Známější limity ERPG (směrnice pro plánování odezvy na případ nouze) pro expoziční čas 1 hodina se používají pouze v případě, kdy pro danou látku nejsou stanoveny limity AEGL.

Oficiální definice úrovní AEGL (směrnic pro úrovně akutní expozice) jsou:

- AEGL – 1: úroveň expozice *nad kterou* populace jako celek (včetně citlivě reagujících jedinců) může pocítit nějaké nápadné nepohodlí (nevyřazující z činnosti, dočasné a reversibilní);
- AEGL – 2: úroveň expozice *nad kterou* populace jako celek (včetně citlivě reagujících jedinců) může zakusit vážné dlouhodobé účinky nebo zhoršení schopnosti úniku;
- AEGL – 3: úroveň expozice *nad kterou* by mohla populace jako celek (včetně citlivě reagujících jedinců) zakusit účinky ohrožující život nebo způsobující úmrtí.



Obr. č. 1: Kontinuum expozičních úrovní chemické látky ve vzduchu (obecné znázornění)

Význam zkratek a akronymů:

- LC 50 – smrtelná koncentrace, kdy v exponované skupině populace lze očekávat 50 % úmrtí,
- LC 01 – smrtelná koncentrace, kdy v exponované skupině populace lze očekávat 1 % úmrtí,
- IDLH – bezprostředně nebezpečné pro zdraví a život (30 minutová norma pro pracovní prostředí jako kritérium určující použití úplné ochranné výbavy),
- AEGL – směrnice pro úroveň akutní expozice (definice viz výše),
- STEL – krátkodobý expoziční limit – užívá se v pracovním prostředí ke sledování /udržení bezpečných pracovních podmínek (v podmínkách ČR se této mezi nejvíce blíží tzv. nejvyšší přípustná koncentrace NPK),
- TWA – TLV – časově vážený průměr koncentrace, používaný v pracovním prostředí pro zaručení permanentně bezpečných podmínek (v podmínkách ČR se této mezi nejvíce blíží tzv. přípustný expoziční limit PEL).

Uvedené definice by neměly být interpretovány příliš doslovně. Konečné hodnoty AEGL expozic (zejména pro bojové chemické látky) jsou navrženy tak, aby byly velmi ochranné.

Jako příklad může posloužit přehled „bezpečných, příp. nebezpečných úrovní“ expozic tak běžné průmyslové chemikálie, jako je amoniak uvedené v tabulce č. 1 (podle [4]).

Mez, norma, směrnice	Doba trvání expozice							
	2 – 10 minut	10 minut	30 minut	1 hodina	4 hodiny	8 hodin	8 hod.za den	24 hod. za den
LC 50	> 5000							
AEGL 3		1880	1120	770	383	272		
AEGL 2		188	112	77	77	77		
AEGL 1		18	18	18	18	18		

IDLH			300					
STEL				27				
TLV							18	
Emise								0,35

Tabulka č. 1: Kritéria pro amoniak ve vzduchu (mg/m^3)

Účinky nebezpečných událostí

Aby bylo možno kvantifikovat riziko, je nezbytné převést fyzikální projevy havárie (požár, výbuch, toxický rozptyl) na informaci jaký následek mají tyto jevy na lidi, majetek a životní prostředí. Toto bývá nazýváno jako dopad události a lze to vyjádřit mnoha způsoby.

Nejsnáze aplikovatelná metoda se týká výběru určitých úrovní dopadů pro ilustraci nepříznivých výsledků. Je možné např. stanovit, že určitá úroveň tepelné radiace, přetlaku na čele výbuchové vlny nebo toxické koncentrace znamená úmrtí; v takovém případě jakákoliv osoba, která obdržela tuto nebo větší dávku je považována za usmrcenou, zatím co všichni ostatní, kteří obdrželi nižší dávku, se pokládají za přeživší.

Avšak tato metoda je více méně limitována tím, že nebere v úvahu proměnlivou citlivost lidí podrobených fyzikálním projevům havárie. Za určitých okolností není tento postup použitelný, specielně tehdy, kdy se uvažuje buď o velmi krátké nebo naopak o velmi dlouhé době expozice.

Pro překonání tohoto nedostatku byl přijat sofistikovanější přístup, a sice analýza metodou probit funkce, která dovoluje předpovídat pravděpodobnosti nepříznivých následků (neboli dopadů, obvykle úmrtí nebo zranění) pokud jsou známy podmínky expozice týkající se časově proměnné úrovně tepelné radiace, přetlaku na čele výbuchové vlny nebo koncentrace toxických par. Tento přístup bere v úvahu rozdíly v citlivosti lidí, má však rovněž určitá omezení a je mnohem složitější při použití. Zvláště data používaná k odvození probit vztahů jsou náchylná k určitému stupni nejistoty. Spolehlivá data o působení fyzikálních projevů havárie na lidi jsou dostupná jen zřídka, takže se často používají data založená na experimentech se zvířaty, a to hlavně pro toxické expozice.

Tvar funkce probit (Pr)

Pokud není znám exponent toxické dávky n, je možno ji rozložit na dva členy: ln C pro koncentraci toxické látky při expozici a ln t pro dobu trvání expozice, tedy:

$$Pr = d_1 + d_2 \,.\, ln\ C + d_3 \,.\, ln\ t \qquad (1)$$

Konstanty d_1, d_2, d_3 jsou dány tím, aby nejlépe vystihovaly experimentální data. Pro zjištění těchto konstant se přepíše rovnice za účelem nalezení těchto konstant na tvar:

$$Pr = d_1 + d_3 \,.\, ln\ (C^{d2/d3} \,.\, t) \qquad (2)$$

Potom exponent toxické dávky je $n = d_2/d_3$. V literatuře jsou konstanty d_1 a d_3 obvykle označeny jako a a b a zápis

rovnice, kde rozměr koncentrace je *mg/m*^{3} nebo *ppm* a rozměr času je *minuta*, je uváděn následovně:

	$Pr = a + b \,.\, ln\,(C^n \,.\, t)$	(3)

Stručný přehled geneze analýzy pomocí probitu

Pro jednostranně ohraničená data je nejrozšířenější alternativou normálního rozdělení logaritmickonormální rozdělení [5]. Např. koncentrace určité chemické látky jsou buď kladné, nebo mají přirozeně definovaný počátek (v analyzovaném vzorku se koncentrace chemické látky od nulové hodnoty zvětšuje pouze v kladném směru). Na rozdíl od normálního (nebo Gaussova) rozdělení není rozdělení logaritmickonormální obecně tak známo, jak by mělo odpovídat jeho významu v běžném životě.

V současnosti existuje dostupný fyzikální model [6], který poskytuje hlavní vodítko k pochopení rozložení takových jevů, jako jsou např. [7]:

- výskyt nerostných zdrojů v zemské kůře,
- přítomnost škodlivých látek v atmosféře,
- vnímavost jednotlivců v populaci vůči chemickým látkám,
- doba přežívání při diagnostikování onkologických onemocnění, atd.

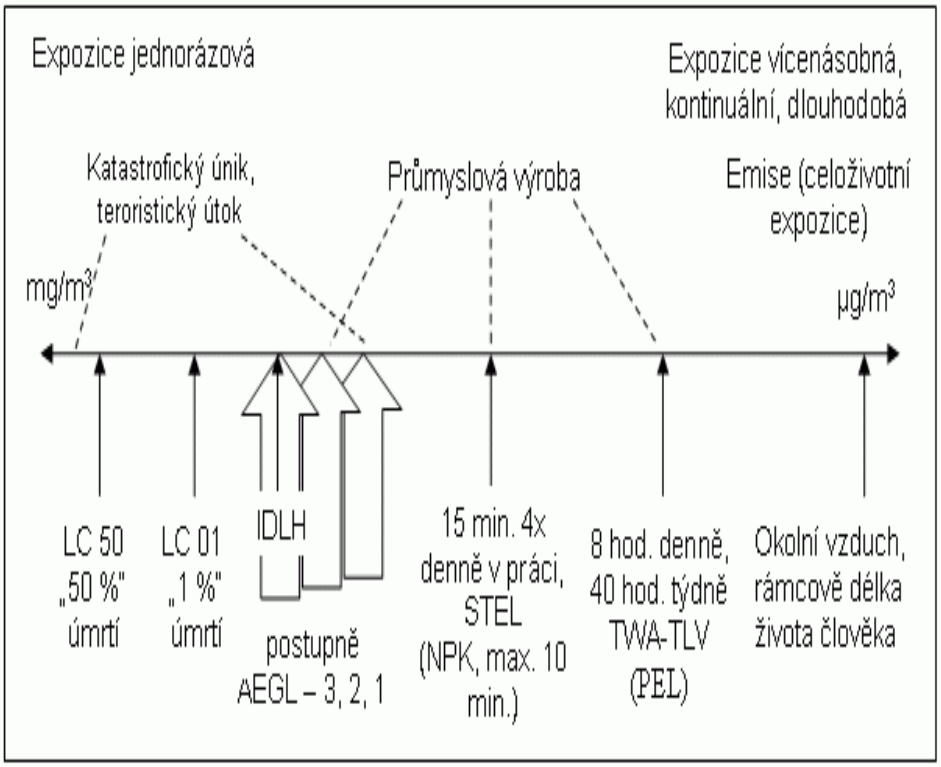
Náhodná veličina *x* má logaritmickonormální rozdělení, když veličina *y = ln (x)* má rozdělení normální.

Obr. č. 2 a obr. č. 3 názorně ilustrují tento vztah mezi oběma rozděleními.

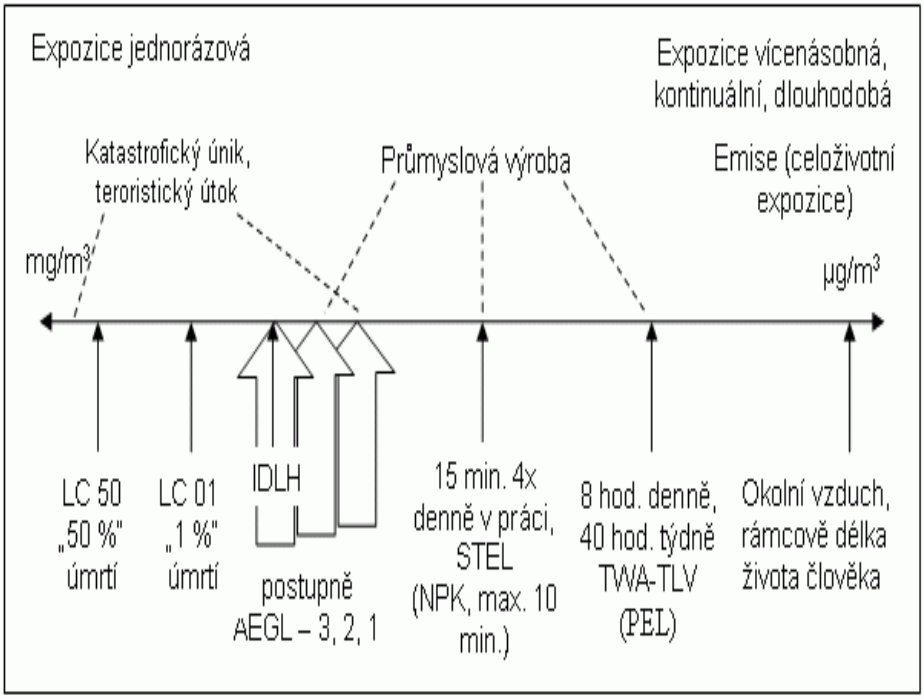
Dalším krokem je zavedení pojmu pravděpodobnostní jednotky, neboli tzv. probitu (**pro**bability un**it** = **probit**). Probit reprezentuje % populace, reagující na podnět, vyjádřené jako funkce jednotek standardní (směrodatné) odchylky od střední hodnoty.

Provede se to pomocí operace, při které se vzájemně přiřadí k oblastem vymezeným velikostí směrodatné odchylky na obě strany od střední hodnoty pravděpodobnost (nebo procento) pozorování, které do těchto oblastí spadají [8]. To je znázorněno na obr. č. 4.

Někdy se tyto oblasti nazývají „normální ekvivalent směrodatných odchylek“ [9] (viz též tab. č. 2).



Obr. č. 2: Hustota pravděpodobnosti lognormálního rozdělení



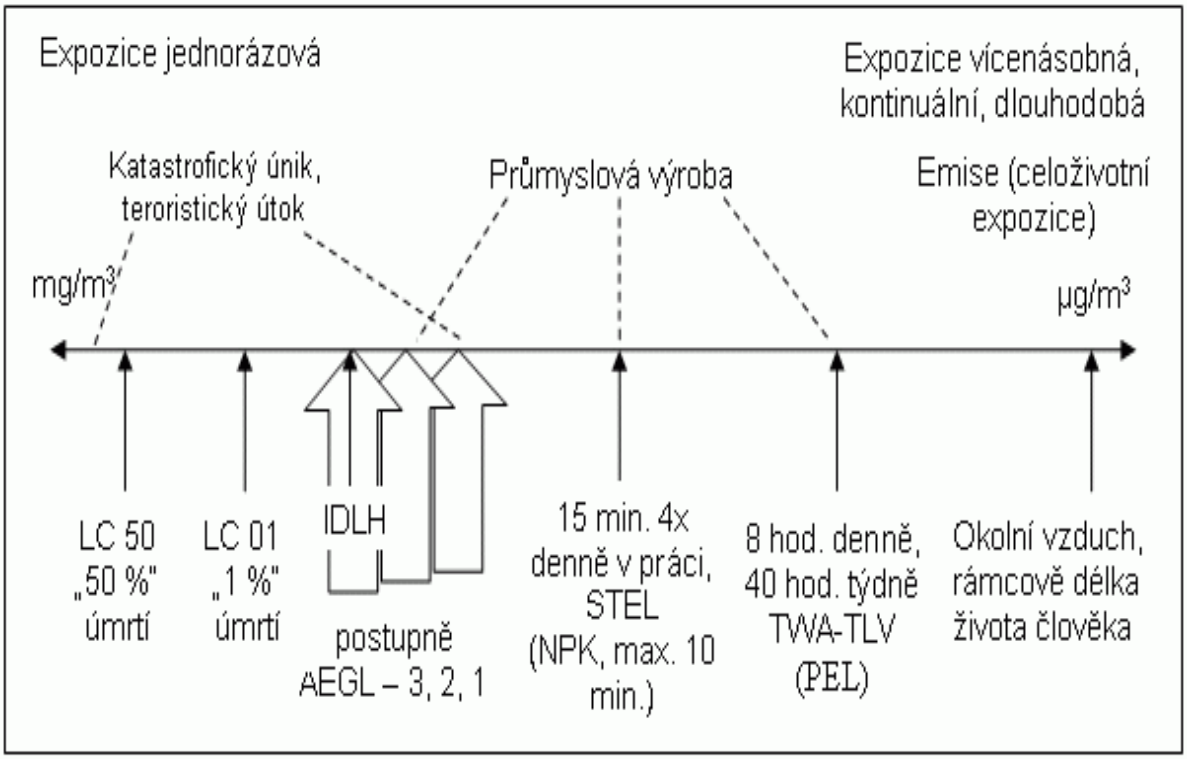
Obr. č. 3: Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení

Tento ekvivalent pro 50 % pozorování (nebo pravděpodobnost 0,5) je roven 0. Aby se vyloučilo počítání se zápornými čísly, přiřadí se k hodnotám tohoto ekvivalentu + 5. Celou transformaci funkce probit ilustruje obr. č. 4 a rovněž tabulka č. 2.

Pravděpodobnost výskytu jevu	Procenta výskytu jevu	Přiřazená hodnota směrodatné odchylky	Normální ekvivalent směrodatných odchylek	Hodnota funkce probit
0,001	0,1	- 3	- 3	2
0,023	2,3	- 2	- 2	3
0,159	15,9	- 1	- 1	4
0,500	50,0	střední hodnota	0	5
0,841	84,1	+ 1	+ 1	6
0,977	97,7	+ 2	+ 2	7
0,999	99,9	+ 3	+ 3	8

Tabulka č. 2: Transformace probitu (podle [9])

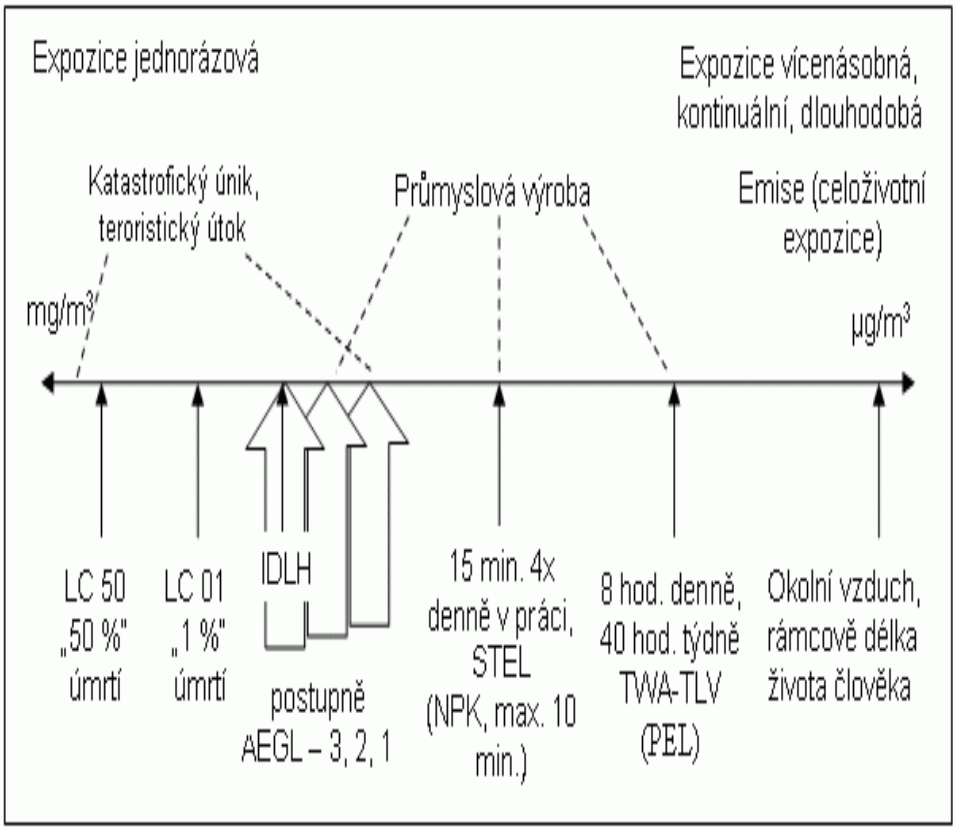
Když se funkce hustoty pravděpodobnosti převede na funkci kumulativní, obdrží se tzv. sigmoidní křivka, znázorněná na obr. č. 5. Ta se nechá dále buď převést na grafické znázornění vztahu mezi funkcí probit a pravděpodobností výskytu jevu v populaci (obr. č. 6), nebo pohodlnější znázornění přímkou (obr. č. 7).



Obr. č. 4: Princip transformace probitové analýzy (podle [8])

Převod křivky na přímku má řadu výhod, z nichž nejdůležitější jsou tyto:

- je možno mnohem přesněji propojit experimentální body (např. při zpracování laboratorních toxikologických testů);
- dovoluje přesnější „inverzní předpověď“ (např. při odhadu reakce populace na určité úrovně expozic způsobených nebezpečnými fyzikálními projevy závažných havárií, jako jsou přetlak na čele vlny v případě výbuchu, tepelná radiace v případě požáru nebo dávka při rozptylu toxické látky);
- umožňuje statistickou analýzu využitím regrese / lineárních modelů.



Obr. č. 5: Kumulativní funkce lognormálního rozdělení (sigmoidní křivka)

Pro praktické výpočty pravděpodobnosti konkrétního stupně odezvy populace na zasažení fyzikálními projevy způsobenými závažnou průmyslovou havárií s přítomností chemických látek se většinou používá tabelovaných hodnot uvedených v tabulce č. 3.

Pro každý stupeň dopadu (např. vznik popálenin 2. nebo 3. stupně způsobených tepelnou radiací při požárech) je třeba znát koeficienty příslušné probit funkce, a pak je možno provést nejen odhad lokalizace zasažení, ale také odhad pravděpodobnosti jeho rozsahu v populaci. V další části bude uveden příklad dopadu rozptylu extrémně nebezpečné toxické látky na rezidenční nechráněnou oblast.

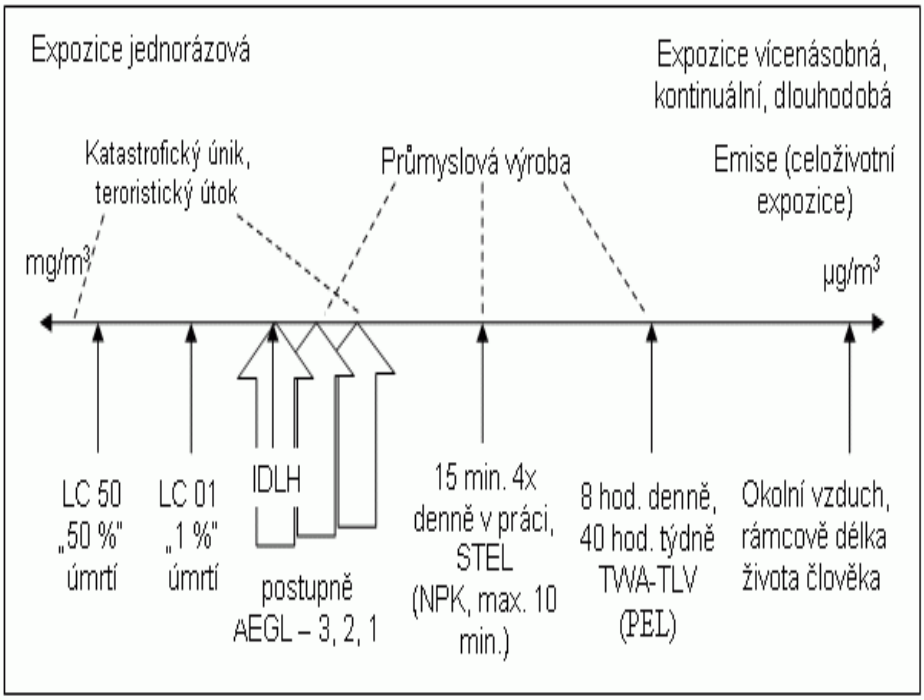
ALOHA, verze 5.4.1

ALOHA [10, 11] je volně dostupný počítačový program určený především pro využití lidmi, kteří se zabývají plánováním potenciálních úniků chemických látek (bezpečnostní analytici) nebo naopak zásahům proti havarijním únikům chemikálií (zejména hasiči a pak i další záchranáři). Rozptylový model ALOHA byl původně rozpracován pro případy,

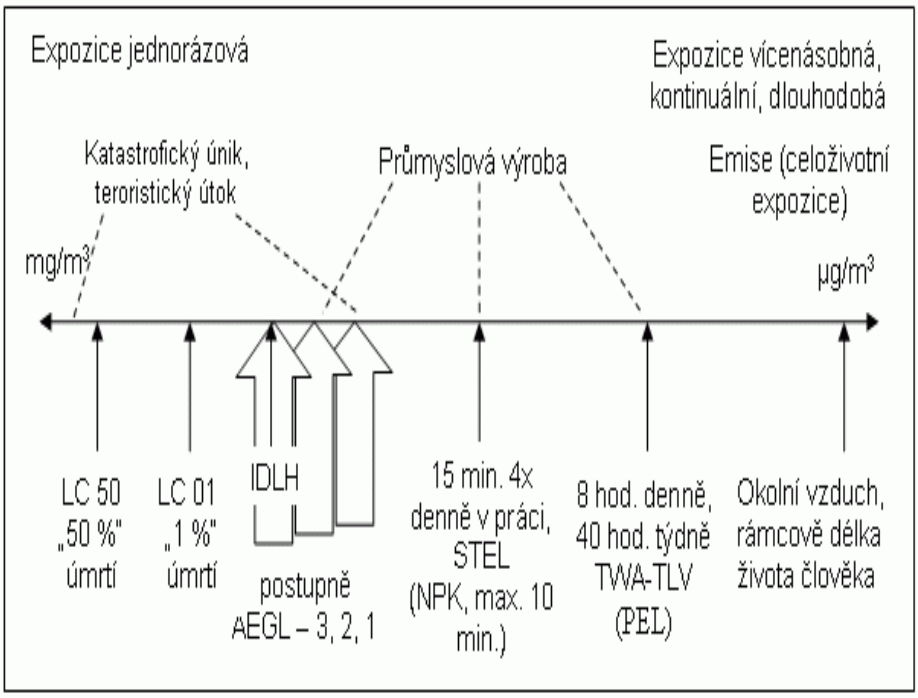
jak se může rozptylovat toxický oblak po havarijním úniku chemické látky. V současnosti může ALOHA modelovat i takové ohrožení způsobené únikem chemikálie, jako jsou požáry a výbuchy oblaků par a plynů .

ALOHA je navržena k tomu, aby ukázala při využití záchranáři v případě havárie přiměřené výsledky dostatečně rychle. Takže výpočty ALOHY představují kompromis mezi přesností a rychlostí. Mnoho vlastností ALOHY bylo předurčeno v zájmu rychlé pomoci záchranářům. ALOHA např.:

- minimalizuje chyby při vkládání vstupních dat prověřením vstupních hodnot a upozorněním uživatele na to, že vstupní hodnota je nepravděpodobná nebo fyzikálně nemožná;



Obr. č. 6: Vztah probit funkce a pravděpodobnosti zasažení populace



Obr. č. 7: Převod sigmoidní křivky na přímku

- obsahuje vlastní chemickou knihovnu s fyzikálně-chemickými vlastnostmi přibližně 1000 běžných nebezpečných chemikálií, takže uživatelé tato data nemusí vkládat.

Hlavní charakteristické rysy programu jsou následující:

- vytváří širokou paletu charakteristických výstupů pro scénář včetně půdorysů zón ohrožení, grafů ohrožení ve specifikované místě, grafů intenzity (rychlosti výtoku) zdroje;
- vypočítává rychlosti výtoku chemikálií unikajících ze zásobníků nebo potrubí, vypočítává rychlosti odparů chemikálií z kaluží a předpovídá, jak se tyto rychlosti přechodu do okolního prostředí mění s časem;

P	**0**	**0,01**	**0,02**	**0,03**	**0,04**	**0,05**	**0,06**	**0,07**	**0,08**	**0,09**
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
0,1	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
0,2	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
0,3	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
0,4	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
0,5	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
0,6	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
0,7	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
0,8	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23

0,9	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
	0,0	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
0,99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Tabulka č.3: Hodnoty probit (Pr) jako funkce pravděpodobnosti P (P x 100 = %)

- modeluje mnoho scénářů úniku chemikálií: oblaky toxických plynů, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion = exploze expandujících par vroucí kapaliny), tryskové požáry, exploze oblaků par, požáry kaluží;
- vyhodnocuje různé typy nebezpečí (v závislosti na scénáři úniku): toxicitu, hořlavost, tepelnou radiaci, přetlak na čele výbuchové vlny;
- modeluje atmosférický rozptyl unikající chemikálie na vodní hladině.

ALOHA je navržena tak, aby byla snadno použitelná a využitelná záchranáři ve velmi náročných situacích. Řada dialogových oken vybízí uživatele k vložení informací o scénáři (např. o chemikálii, podmínkách počasí, terénu, parametrech zdroje rizika a podmínkách úniku). Každé dialogové okno je opatřeno podrobnou nápovědou. Informace o scénáři a výsledky výpočtů jsou shrnuty v textovém okně, které se nechá vytisknout. Když ALOHA ukončí výpočet, uživatelé si mohou vybrat různá zobrazení z následující palety grafických výstupů, z nichž každý se nechá opět vytisknout.

Okno zóny ohrožení

Současně se zobrazí až 3 zóny ohrožení v jednom grafu. Zóny ohrožení představují plochu, v jejíchž mezích program předpovídá, že úroveň nebezpečí (toxicita, hořlavost, tepelná radiace nebo přetlak na čele výbuchové vlny) převyšuje určitou úroveň znepokojení (v originále „level of concern“) v době po začátku úniku.

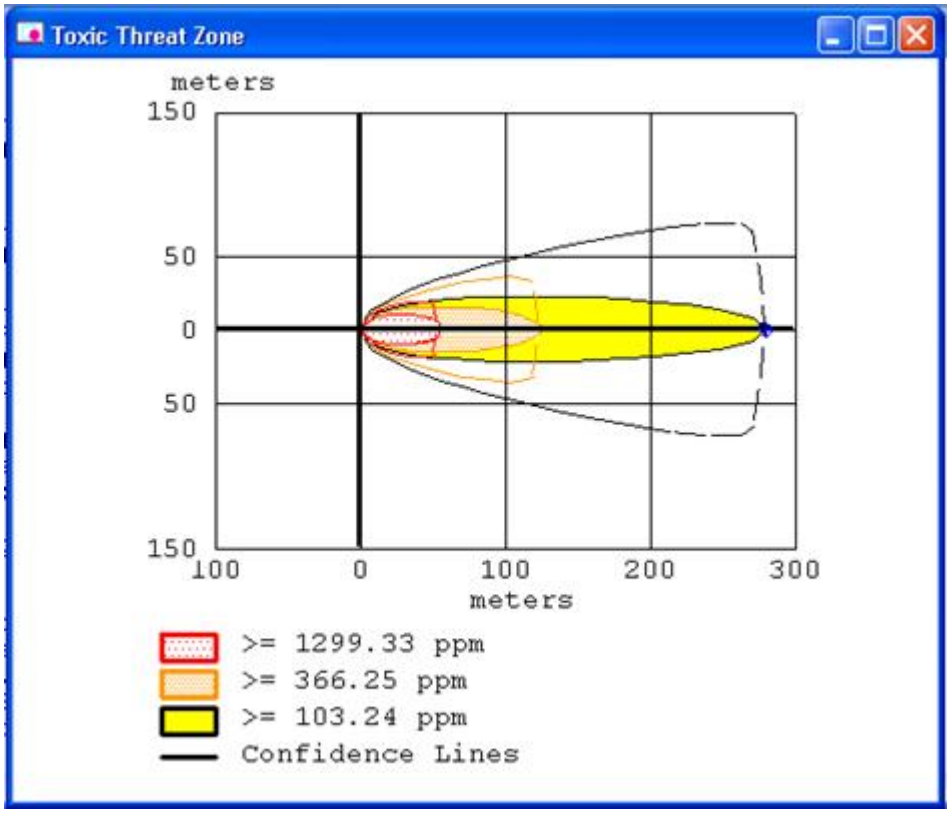
Zvolí-li se meze všech 3 úrovní znepokojení, zobrazení bude provedeno třemi barvami: červená stopa označí plochu největšího nebezpečí, nižší a nejnižší úroveň nebezpečí bude označena stopou oranžovou a žlutou. Pro scénáře rozptylu jsou znázorněny po obou stranách stop linie představující neurčitost ve směru vanutí větru. Program statisticky předpovídá 95%-ní pravděpodobnost výskytu stopy oblaku nebo vlečky rozptylující se chemické látky ve středu grafu. Plochy na obou stranách stopy potom představují 5%-ní pravděpodobnost výskytu rozptylované chemikálie. Výše popsané poměry jsou znázorněny na obr. č. 8.

Okno ohrožení v určitém bodě

Zde jsou zobrazeny specifické informace o nebezpečí ve vybraném bodě zvláštního zájmu (např. škola, nemocnice, domov důchodců atd.), který leží uvnitř nebo v blízkosti zón ohrožení. Program zobrazí nebezpečí v tomto bodě buď jako graf, nebo jako text. Pro rozptyl toxického plynu se zobrazí graf závislosti koncentrace látky na čase. Tato skutečnost je znázorněna na obr. č. 9, č. 10 a č. 11.

Právě tento graf závislosti koncentrace látky na čase v bodě zvláštního zájmu je pro bezpečnostního analytika nejdůležitější, protože dovoluje buď přímo nebo po snadném zpracování (např. grafickou integrací) získat hlavní parametry pro vyčíslení funkce probit v tomto bodě.

Pro analýzu nebezpečí ve sledovaném bodě lze použít velkého množství rozptylových programů mnohdy i značně propracovaných (a rovněž značně nákladných), program ALOHA byl pro ilustraci použití analýzy probit ale vybrán právě proto, že poskytuje tyto parametry takto jednoduše a bezprostředně.



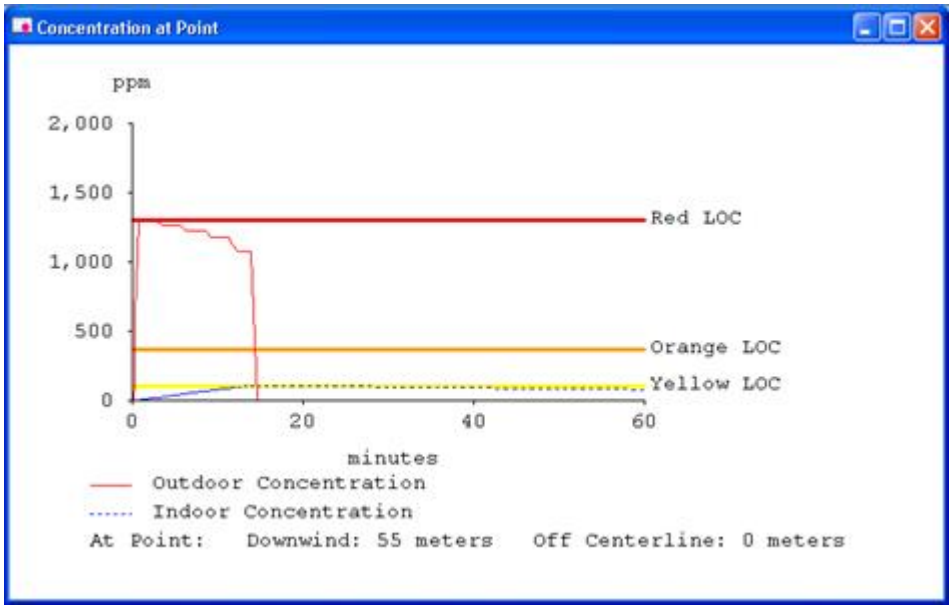
Obr. č. 8: Zóny ohrožení definované pro pravděpodobnosti úmrtí 99%, 50% a 1%; výsledek udává vztah úrovní znepokojení ke koncentracím chloru

Okno intenzity (rychlosti výtoku) zdroje

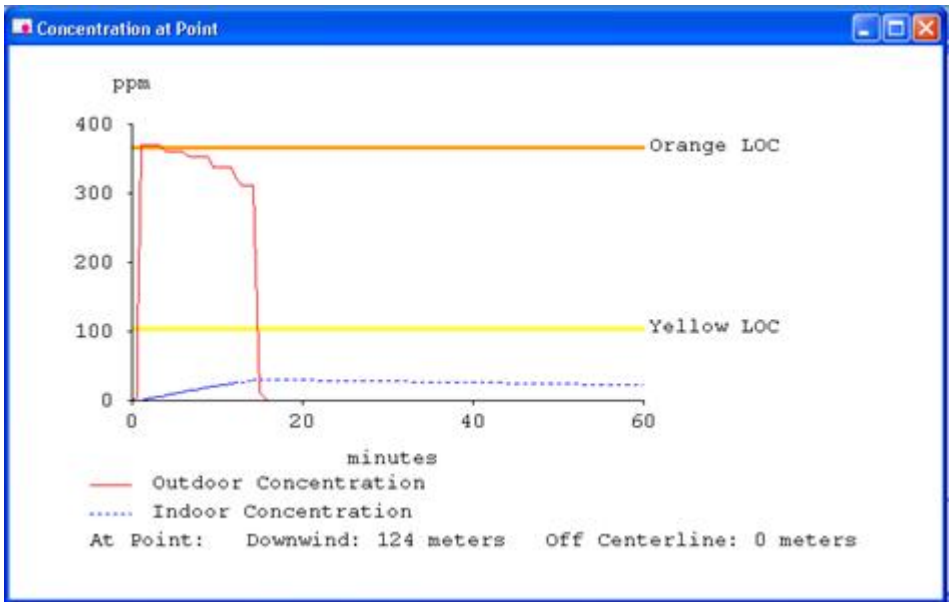
Buď se zobrazí předpovídaná rychlost, jakou chemikálie vytéká do okolního prostředí, nebo rychlost hoření v závislosti na scénáři. Graf ukáže rychlost výtoku (intenzitu zdroje rizika) během 1. hodiny od začátku úniku, nebo dokud se únik nezastaví, a to podle toho co je kratší. Program předpovídá intenzitu zdroje jako sérii stovek krátkých časových kroků. Tyto hodnoty jsou zprůměrovány do několika (obvykle 5) kroků tak, aby výpočet byl proveden rychle. Popsaný výstup ilustruje obr. č. 12.

Okno textového souhrnu

Zde se postupně zapisují všechny vstupní informace o studovaném scénáři (údaje o místě a jeho okolí, údaje o počasí, údaje o zdroji, údaje o fyzikálně-chemických vlastnostech sledované chemické látky a údaje o ztrátě soudržnosti zařízení) a všechny výsledky, které program vypočítává (intenzita výtoku chemikálie, zóny ohrožení, ohrožení v určitém bodě) jako text (viz tab. 4).



Obr. č. 9: Úroveň ohrožení populace v bodě vzdáleném 55 m od zdroje úniku chloru: max. koncentrace chloru vně budov je 1299,3 ppm, uvnitř budov 107 ppm

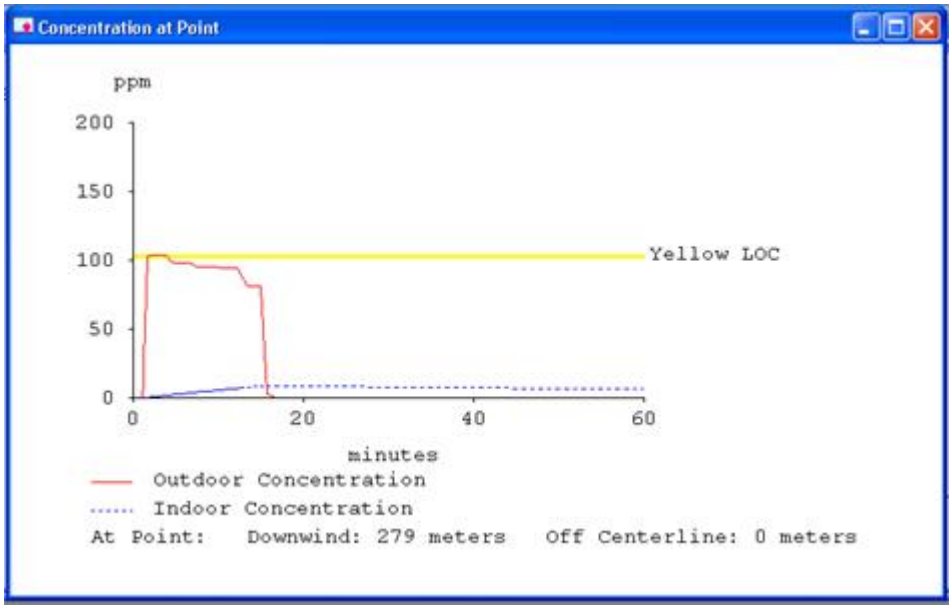


Obr. č. 10: Úroveň ohrožení populace v bodě vzdáleném 124 m od zdroje úniku chloru: max. koncentrace chloru vně budov je 366,25 ppm, uvnitř budov 30,8 ppm

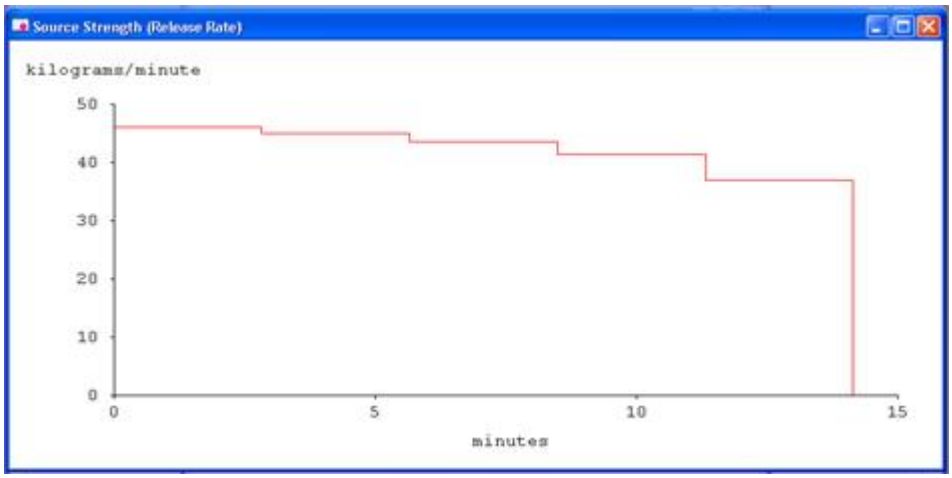
Jednoduchý příklad

Výše popsané vlastnosti programu ALOHA je možno nejsnáze představit na jednoduchém příkladu.

Sud, obsahující 600 kg chloru, je připojen na straně kapaliny trubkou o vnitřním průměru 10 mm k technologickému zařízení. Při plně otevřeném ventilu odběru chloru (O sedla ventilu je rovněž 10 mm) se předpokládá nejhorší případ havárie připojovací trubky – totální ruptura.



Obr. č. 11: Úroveň ohrožení populace v bodě vzdáleném 279 m od zdroje úniku chloru: max. koncentrace chloru vně budov je 103,24 ppm, uvnitř budov 8,5 ppm



Obr. č. 12: Intenzita zdroje rizika (rychlost výtoku chloru)

V tabulce č. 4 (textový souhrn) jsou zaznamenána všechna data vložená do programu, tj. údaje o místě, chemické údaje, atmosférické údaje, potřebné konstrukční údaje o zařízení (sudu) a parametry charakterizující poruchu.

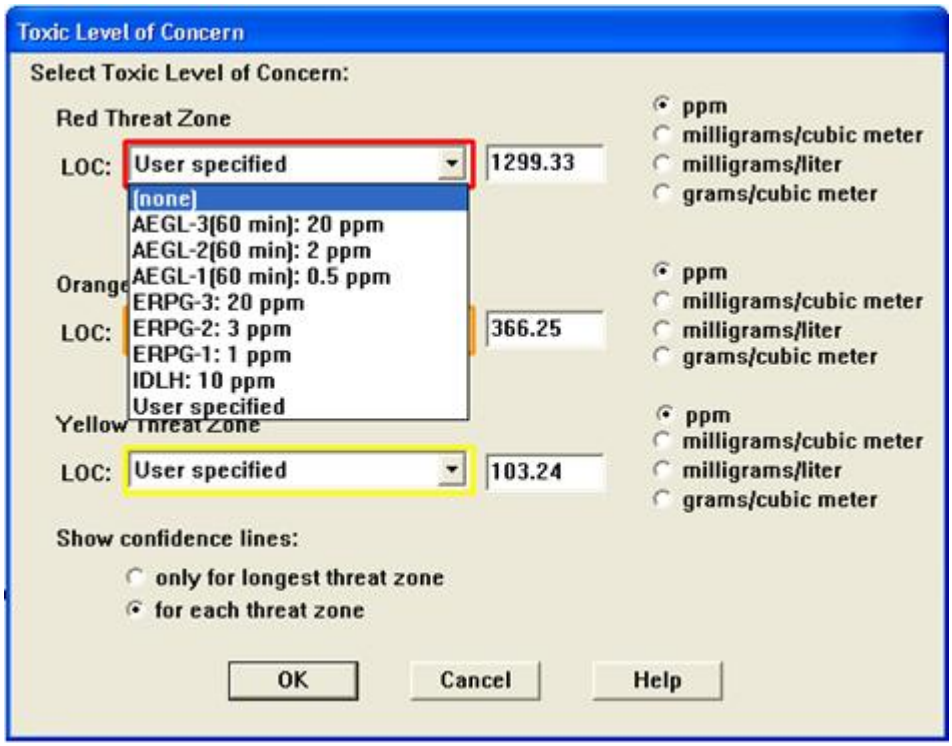
Dále jsou zde uvedena i data vypočtená: doba trvání výtoku (14 minut), počáteční výtoková rychlost (45,9 kg/min.) a celkové vyteklé množství (600 kg).

Program dále nabízí možnost zobrazit specifikované zóny ohrožení a předpověď ohrožení v určitém místě zasažené plochy.

Pro případ demonstrace využití analýzy probit je predikce velikosti zón ohrožení specifikována pro pravděpodobnosti úmrtí nechráněné populace 0,01; 0,50; 0,99 (tj. 1%, 50% a 99%). Tomu odpovídají hodnoty funkce probit (dle tab. č. 3) 2,67; 5,00; 7,33.

Pro následující výpočty je třeba převést tvar rovnice (3) na výraz pro výpočet koncentrace *C*, aby bylo možno určit,

jaká koncentrace par chloru při době trvání expozice t = 14 minut zakládá takové úrovně znepokojení, které odpovídají výše specifikovaným pravděpodobnostem úmrtí.



Obr. č. 13: Výběr úrovní znepokojení pro uživatelem specifikovanou koncentraci toxické chemikálie (z obrázku je patrné, že vedle implicitně uvedených limitů je možné zadat prakticky libovolný údaj v různých rozměrech)

(4)

Tvar funkce probit pro chlor má konstanty a = -8,29, b = 0,92 a n = 2 [12], přičemž C je koncentrace v *ppm* objemových a t je čas v *minutách*. Protože jsou známy všechny parametry výrazu, výsledky výpočtů a další údaje získané z programu ALOHA jsou shrnuty v následující tabulce č. 5.

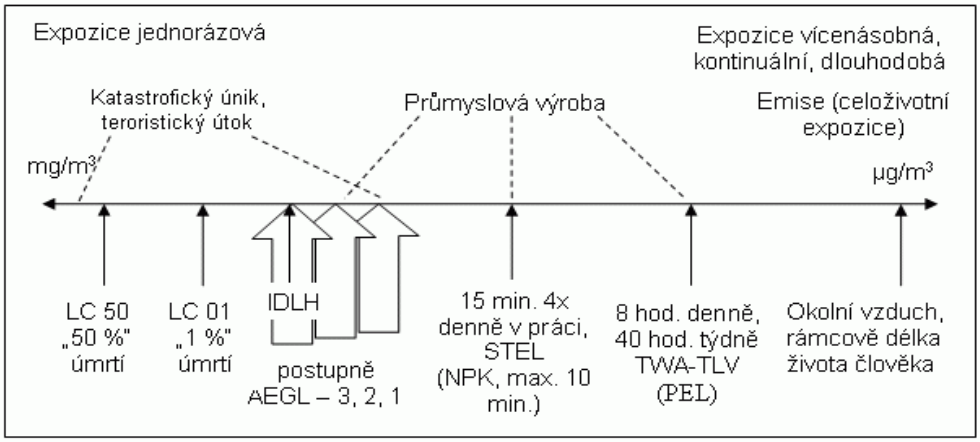
Využití výsledků prognostického modelování pro havarijní plánování

Výsledky získané programem ALOHA zobrazené *oknem zóny ohrožení* je možno přímo vkládat do elektronických map nebo plánů na bázi GIS v takových proporcích, které si vzájemně odpovídají jak měřítkem zobrazení, tak zeměpisnou orientací.

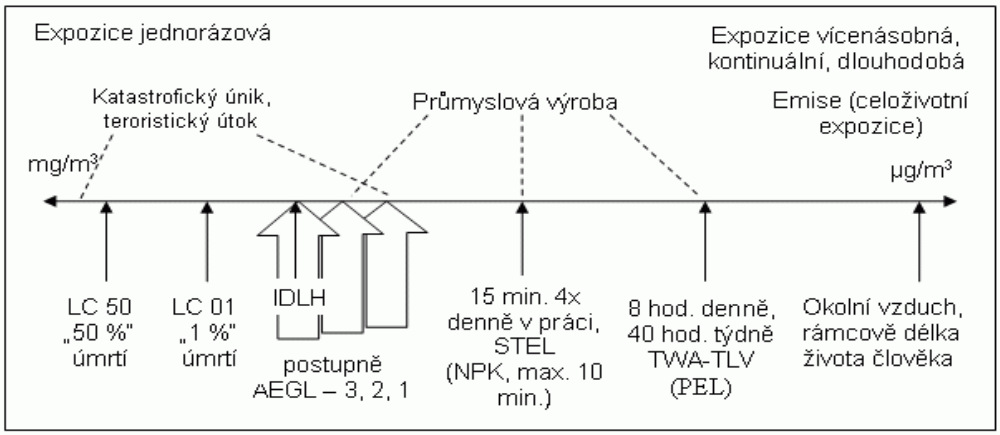
Tím je okamžitě identifikována ohrožená rezidenční zóna. Její obrysy vymezené stopou rozptylované extrémně nebezpečné chemické látky je pak možné vyšetřit pomocí zobrazení oknem *ohrožení v místě*. Tak lze získat přehled o časových i koncentračních charakteristikách rozptylu a pomocí funkce probit o pravděpodobnosti úmrtí nechráněné populace. Probit je funkce toxické dávky pro jednotlivce. Pokud koncentrace C je konstantní během doby expozice t, pak toxická dávka D je ekvivalentní výrazu $D = C^n \times t$. Pokud se doba i koncentrace se vzdáleností od zdroje úniku významně mění, toxická dávka se vypočítá jako $D = ?C^n\, dt$; probit funkce Pr by se měla počítat stejně.

Tento problém lze např. vyřešit grafickou integrací (např. planimetrováním) a získat tak parametry C, t pro výpočet funkce probit jak je naznačeno na obr. č. 14.

- hodnoty pro výpočet probit funkce (získané grafickou integrací koncentrační křivky, např. planimetrováním):



- koncentrace jako funkce času:



Obr. č. 14: Stanovení veličin *C* a *t* z údajů ALOHA potřebných pro výpočet funkce probit (znázornění vzhledu charakteristických křivek a způsobu jejich vyhodnocení)

% úmrtí (vně budov)	Probit	Koncentrace [ppm]		% úmrtí (uvnitř budov)	Vzdálenost [m] od zdroje
		vně budov	uvnitř budov		
99	7,33	1299,33	107	? 1	55
50	5,00	366,25	30,8	< 1	124
1	2,67	103,24	8,5	<< 1	279

Tabulka č. 5: Souhrn uživatelem zadaných údajů (% úmrtí, resp. Probit) a ALOHOU predikovanách výsledků (koncentrace, vzdálenost, předpověď úmrtnosti v úkrytech) pro daný příklad

ALOHA omezuje expoziční dobu t na čas odpovídající trvání události 60 minut. Příchod oblaku může být definován jako okamžik, kdy pravděpodobnost Púmrtí přesáhne 1 % nebo kdy koncentrace nebezpečné látky vně budov vzroste nad emisní limit (nebo jinak definovanou směrnici – NPK, AEGL, IDLH, AETL apod.). Stejným způsobem lze definovat konec přechodu oblaku nad týmž místem.

Pobyt uvnitř budovy nebo úkrytu redukuje toxickou dávku, protože koncentrace uvnitř je nižší než koncentrace vně budovy nebo úkrytu (viz tab. č. 5). Je třeba zdůraznit, že vnitřní dávka silně závisí na době průchodu oblaku okolím,

rychlosti obměny vzduchu v obydlích (úkrytech) během průchodu oblaku okolím a vyvětrání budov (úkrytů) po průchodu oblaku okolím. A to vše za předpokladu, že budou v budovách včas uzavřeny všechny otvory (okna, dveře, klimatizace atd.).

Doba průchodu oblaku se mění se vzdáleností od zdroje a je různá pro každý případ poruchy zařízení, rychlost výtoku nebezpečné toxické látky ze zařízení a místních klimatických podmínek. Proto musí být dávka uvnitř budov (úkrytů) vypočítána pro každý případ poruchy zařízení, pro každou vzdálenost a pro klimatické podmínky reprezentované směrově a stabilitně orientovanou větrnou růžicí.

Jinak je obvyklé v odborné literatuře, že se pro demonstraci reprezentativních scénářů uvádějí dvě základní charakteristiky počasí, a to:

- pro noční dobu: třída stability F (stabilní), rychlost vanutí větru 1 – 2 m/s;
- pro denní dobu: třída stability D (neutrální), rychlost vanutí větru 5 m/s.

Rychlost obměny vzduchu silně závisí na parametrech, jako jsou typ a stáří obydlí, podmínky počasí a otevírání a zavírání oken. Nejsou-li dostupné žádné specifické informace, měla by být použita rychlost obměny vzduchu 1 x za hodinu za předpokladu absence jakékoliv adsorpce.

Neočekává se, že by lidé věděli, kdy už oblak okolím prošel. Protože rychlost obměny vzduchu po průchodu oblaku je stejná jako rychlost obměny vzduchu během jeho průchodu, může být doba prodlevy mezi průchodem oblaku a počátkem celkového vyvětrání při otevřených oknech v mezích trvání události predikovaných programem ALOHA (tj. 1 hodina) dosti dlouhá.

Predikovaná maximální doba expozice uvnitř budov je také 60 minut. Dobu prodlevy mezi ukončením průchodu oblaku a počátkem celkového vyvětrání při otevřených oknech je možno podstatně zkrátit a tím snížit velikost dávky, kterou obdrží ukrytí jednotlivci.

Vše to závisí na včasném varování, komunikaci, povědomosti dotčené populace o nebezpečí a v neposlední řadě na kvalitě havarijního plánování a činnosti zásahových složek při nežádoucí události.

Čísla uvedená v tab. č. 5 se vztahují k variantě, kdy se veškerá populace nachází v případě havárie buď vně budov nebo uvnitř budov. Jelikož takový případ je velmi specifický a ojedinělý, obecně je třeba se ještě zabývat podílem přítomnosti populace uvnitř a vně budov. Určité vodítko nabízí metodologie [13].

Podíly přítomnosti populace uvnitř a vně budov

Předpokládá se, že přinejmenším část obyvatelstva je chráněna tím, že zůstane uvnitř budov a nějakou, byť improvizovanou ochranu. Proto jsou používány rozdílné hodnoty pro podíly obyvatel, kteří zahynou uvnitř a vně budov a proto musí být stanoveny podíly obyvatel nacházejících se uvnitř a vně budov fpop, in a fpop, out. Základní hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. č. 6 spolu korekcí výsledků prognostického modelování, které byly uvedeny v tab. č. 5. Hodnoty platí pro obytné a průmyslové plochy, pokud nejsou dostupné jiné informace. Pro rekreační oblasti určuje podíly obyvatel nacházejících se uvnitř a vně budov typ rekreace.

Všechny dosud uváděné výsledky předpokládaly odhady počtů smrtelně zasažených osob pouze obecně vzhledem k hustotě zalidněnosti obytných ploch v okolí objektu. Modelování nejhorších následků událostí s přítomností chloru zároveň ukázalo na velký význam jejich zmírnění, pokud ohrožení lidé přečkají průběh události uvnitř budov. Přítomnost obyvatel na plochách účinků se mění s časem, jak lidé vyjíždějí z oblasti za prací, do škol atd. Využije-li se tedy metodický postup dle [13], pak je možno výsledky korigovat na podíly přítomnosti obyvatel během denního a nočního času. K tomu se použijí následující pravidla:

- denní čas se vztahuje na období 8:00 - 18:30 hod. SEČ, noční čas na období 18:30 – 8:00 hod. SEČ;
- v obydlených oblastech se podíl přítomného obyvatelstva v denním čase rovná 0,7, podíl přítomného obyvatelstva v nočním čase je roven 1,0.

Dále je třeba tyto koeficienty korigovat ještě podíly přítomnosti lidí vně a uvnitř budov. K tomu se použijí následující pravidla:

- podíl přítomnosti obyvatel uvnitř budov v denní době se rovná 0,93 a v noční době 0,99,
- podíl přítomnosti obyvatel vně budov v denní době se rovná 0,07 a v noční době 0,01.

Doba	Pravděpodob. úmrtí korig. podílem obyv.		$f_{pop, out}$	$f_{pop, in}$	Pravděpodob. úmrtí korig. distrib. obyv.		% úmrtí	
	vně	uvnitř			vně	uvnitř	vně	uvnitř
denní	0,693	? 0,007	0,07	0,93	0,0485	? 0,0065	4,85	? 0,65
(podíl	0,350	< 0,007	0,07	0,93	0,0245	< 0,0065	2,45	< 0,65
0,7)	0,007	<< 0,007	0,07	0,93	0,0005	<< 0,0065	0,05	<< 0,65
noční	0,99	? 0,01	0,01	0,99	0,0099	? 0,0098	0,99	? 0, 98
(podíl	0,50	< 0,01	0,01	0,99	0,0050	0,00495	0,50	< 0,495
1,0)	0,01	<< 0,01	0,01	0,99	0,0001	0,000099	0,01	<< 0,0099

Tabulka č. 6: Dvojí korekce vypočtené pravděpodobnosti úmrtí v zóně zasažení (viz tab. č. 5) nebezpečnou toxickou látkou jednak podílem přítomného obyvatelstva, jednak jeho distribucí uvnitř ($f_{pop, in}$) a vně ($f_{pop, in}$) budov pro denní a noční dobu

Pro průběh událostí s přítomností chloru to znamená, že odhad počtu úmrtí osob vně budov způsobených toxicitou chloru může klesnout v denní době až na hodnotu 5% a v noční době až na 1 % teoretického odhadu zjištěného analýzou rizika (což je v souladu s výsledky modelování, které vykázaly max. 1% hodnoty odhadu následků pro případy ukrytí uvnitř budov). Modelování událostí rovněž ukázalo, že děje jsou velmi rychlé a na evakuaci v žádném případě nezbude dosti času. Jako jediného opatření pro zmírnění dopadů lze použít pouze ukrytí.

Pro tento stav je potom třeba učinit taková **zásadní opatření**, která zaručí, že lidé trvale obývající okolí objektu nebo zařízení při **každé události s přítomností chloru** vědomě a včas uzavřou ve svých domech okna a dveře a setrvají v nich dokud neodvane toxický oblak mimo jejich domovy. Zejména v noci je to velmi důležité, v letním období by se mnohý z nich nemusel ráno probudit. Toto varování musí být rychlé, indikované monitorovacím systémem již na území

objektu / zařízení a bezprostředně automaticky sdělené na obytné plochy a lidé musí okamžitě zareagovat, musí přesně vědět co mají dělat. Odvolání havarijního stavu by mělo být rovněž automatické na základě monitoringu vyčištění ovzduší na stranách obytných ploch odvrácených od objektu / zařízení.

Shrnutí a doporučení

Softwarový nástroj ALOHA vizualizuje ve spojení s mapovými softwarovými produkty (nebo GIS) plochy ohrožené dopady závažných průmyslových havárií s přítomností chemických látek.

Text Summary ALOHA® 5.4.1

SITE DATA:
Location: PRAHA, CZECH REPUBLIK
Building Air Exchanges Per Hour: 0.40 (unsheltered double storied)
Time: June 10, 2008 1027 hours ST (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: CHLORINE Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1(60 min): 0.5 ppm AEGL-2(60 min): 2 ppm AEGL-3(60 min): 20 ppm
IDLH: 10 ppm
Carcinogenic risk - see CAMEO
Ambient Boiling Point: -34.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 5 meters/second from w at 10 meters
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 20° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:
Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 0.75 meters Tank Length: 1.2 meters
Tank Volume: 0.53 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 20° C
Chemical Mass in Tank: 600 kilograms
Tank is 80% full
Circular Opening Diameter: 1 centimeters
Opening is 0 meters from tank bottom
Release Duration: 14 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 45.9 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 600 kilograms
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
Model Run: Heavy Gas
Red : 55 meters --- (1299.33 ppm)
Orange: 124 meters --- (366.25 ppm)
Yellow: 279 meters --- (103.24 ppm)

THREAT AT POINT:
Concentration Estimates at the point:
Downwind: 279 meters Off Centerline: 0 meters
Max Concentration:
Outdoor: 104 ppm
Indoor: 8.5 ppm

Tab. č. 4: Textový souhrn

Tyto plochy lze pak dále vyšetřovat v závislosti na intenzitě zdroje nebezpečí a velikosti zasažené plochy (charakterizované zalidněností) a následně identifikovat různé stupně závažnosti dopadů.

Při havarijním plánování jsou provozovatelé povinni sestavit vnitřní havarijní plán a dodat podklady pro vnější havarijní plán. Ten má být zohledněn ve smyslu ochrany nechráněné populace trvale žijící nebo se vyskytující v blízkosti nebezpečného objektu / zařízení.

Obvykle doporučované limity, směrnice nebo normy ochrany populace (ERPG, AEGL, v EU navrhované AETL) jsou až příliš ochranné a jejich striktní vyžadování a uplatnění navozuje situaci, která pro většinu našich provozovatelů, jejichž objekty a/nebo zařízení jsou v sousedství nebo přímo obklopeny obytnou zástavbou, téměř likvidační.

Předřazení využití funkce probit těmto mezím ochrany populace přináší řešení zejména v případě extrémně nebezpečných toxických látek. Jejich velmi závažné dopady (úmrtí lidí) ve vzdálenostech relativně krátkých (několik desítek až stovek metrů) lze účinně zmírnit neprodleným ukrytím v místě. Program ALOHA poskytuje k tomu potřebné informace, a protože svou koncepcí je silně konzervativní, odhad dopadů na základě z něho získaných údajů je maximálně možný.

Jak zabezpečit neprodlené ukrytí nechráněné populace je společným úkolem provozovatelů (administrativní a technická opatření pro zmírnění dopadů havárie), státní správy (právní předpisy týkající se prevence závažných havárií a účinnost jejich vymáhání) a dotčené populace (povědomost o nebezpečí a připravenost na případ nouze) a jejich vzájemné komunikativnosti, informovanosti a součinnosti.

Závěr

Závěrem lze konstatovat, že nebezpečí chemických látek a přípravků se může projevit různě, může mít různé následky a dopady podle stupně závažnosti nežádoucí události. Naznačená analýza pro účely hodnocení rizika poskytne základ pro omezování, neboli řízení bezpečnosti pro různé okruhy, jako je např. bezpečnost procesů, ochrana zdraví a bezpečnosti při práci zaměstnanců, ochrana populace v okolí objektu nebo zařízení a omezování vlivů na životní prostředí.

Zákon o prevenci závažných havárií s přítomností chemických látek jednoznačně stanovuje povinnosti provozovatelů, kteří s těmito látkami nakládají. Dotčené správní úřady musí znát riziko, které v dané lokalitě představuje příslušný objekt nebo zařízení podle tohoto zákona. Musí tedy znát míru rizika, aby mohly posoudit, zda je toto riziko v jejich zájmové oblasti přijatelné a zda provozovatel akceptoval závěry analýzy rizik a vytvořil funkční systém řízení rizik, přiměřený analyzovaným zdrojům rizik.

Stanovení odhadu pravděpodobnosti úmrtí zasažené populace v okolí objektu nebo zařízení (v budovách i mimo budovy) následkem expozice toxickým oblakem v případě závažné havárie hraje tedy zásadní úlohu nejen při hodnocení rizika a jeho přijatelnosti, ale hlavně při přijímání opatření jak administrativního, tak technického rázu, které vedou buď ke snížení nebo k úplnému odstranění identifikovaného a analyzovaného rizika. Má to zejména význam v našich podmínkách ovlivňujících průmyslové a skladovací činnosti, kdy objekty a zařízení tradičních (a zároveň) největších provozovatelů jsou prakticky již ze všech stran obklopeny residenčními plochami. Striktní vyžadování nižších ochranných limitů (obdobných např. AEGL, nebo v EU navrhovaných AETL) v takovém případě by mohlo být pro náš chemický průmysl likvidační.

Použitá literatura

[1] Zákon č. 59/2006 Sb.

[2] Basic Facts Regarding Chemical Exposure Standards and Guidelines. *USACHPPM/Chemical Standards-Basic Facts*, January 2003. Dostupné na www: < http://www.osha.gov/SLTC/emergencypreparedness/chemical/pdf/tier_2_chemical_standards_and_guidelines_usachppm1_03.pd

>.

[3] *ACUTEX : Metodology to Develop AETLs*. January 2006. 163 s. Dostupné na www: < http://www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=2619>.

[4] HAUSCHILD, Veronique. Chemical Risk Assessment and Exposure Guidelines. March 2003. Dostupné na www: < http://www.osha.gov/SLTC/emergencypreparedness/chemical/ppt/csepp-aegl_march_2003.ppt>.

[5] MELOUN, M.; MILITKÝ, J. *Statistické zpracování experimentálních dat*. Praha, 1994. (Edice Plus). ISBN 80-85297-56-6.

[6] GUT, Ch.; LIMPERT, E.; HINTERBERGER, H. *Modeling the Genesis of Normal and Log-Normal Distributions*. E. Limpert & Inst. of Scient. Comp. of the ETHZ, Last modified: 24.02.2004. Dostupné na www: < http://www.inf.ethz.ch/personal/gut/lognormal/>.

[7] LIMPERT, E.;STAHEL, W. A. *Life is log-normal!* E. Limpert ETH Zurich, Last modified: 13.11.2002. Dostupné na www: http://www.inf.ethz.ch/personal/gut/lognormal/brochure.html>.

[8] Dostupné na http://webpub.allegheny.edu/employee/j/palmer/BioES342/lectures/ProbitAnalysis.ppt

[9] MÖLLER, G. Dose – Response Relationship. University of Idaho. Dostupné na www: < http://www.agls.uidaho.edu/etox/lectures/lecture05/slides_DOSE.pdf>.

[10] *CAMEO : Downloading, Instaling and Running ALOHA*. US EPA, Last updated on Thursday, September 18th, 2008 [cit. 2008-11-11]. Dostupné na www: <http://www.epa.gov/OEM/content/cameo/aloha.htm>.

[11] Emergency Response : More Information : ALOHA. US NOAA, First published on September 17, 2007, and last revised on July 14, 2008. Dostupné na www: <http://response.restoration.noaa.gov/aloha>.

[12] *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York : AIChE, 2000. ISBN: 0-8169-0720-X.

[13] *Guidelines for quantitative risk assessment „Purple Book“ : CPR 18 E*. Sdu Uitgevers, den Haag, 1999. ISBN: 90 12 08796 1.

Autor článku:
Ing. Jan Bumba