



MODELOVÁNÍ NEBEZPEČNÝCH DOPADŮ CHEMICKÝCH HAVÁRIÍ

Zdeněk Hon ¹, Michaele Melicharová ², Leoš Navrátil ³

ABSTRAKT

Příspěvek se věnuje problematice chemických havárií, jejich havarijním projevům a matematickým modelům, které slouží pro popis chování těžkých plynů v případě jejich úniku. Rovněž uvádí důvody vytvoření softwarového modulu DEGAS určeného pro modelování šíření těžkého plynu, který bude implementován do expertního systému TerEx a jehož vývoj bude realizován prostřednictvím terénních zkoušek a verifikačních testů.

Klíčové slová: chemické havárie, havarijní projevy, matematické modely.

ABSTRACT

The article focuses on the problem of chemical accidents, the accidental expressions and mathematical models that are used to describe the behavior of heavy gases in the event of leakage. It also states the reasons for creating a software module DEGAS intended for modeling heavy gas that will be implemented in the expert system TerEx which will be developed during field tests and checked by verification tests.

Key words: Chemical Accidents, Accidental Expressions, Mathematical Models.

ÚVOD

Celosvětová výroba nejrůznějších chemických látek představuje několik set milionů tun ročně a její objem se neustále zvyšuje, stejně jako spektrum chemických látek. Společnost je závislá na výhodách, které jim různé chemické látky přinášejí, ale

¹ Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno; tel.: + 420 224 359 973, email: zdenek.hon@fbmi.cvut.cz

² Ing. Michaela Melicharová, T-SOFT a.s., Novodvorská 1010/14, 142 01 Praha 4, tel.: +420 261 710 561/2, email: melicharova@tsoft.cz

³ prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno; tel.: + 420 224 359 902, email: leos.navratil@fbmi.cvut.cz

mnohé z nich vykazují jednu nebo více nebezpečných vlastností (jsou výbušné, hořlavé, toxické, oxidující, žíravé, dráždivé, karcinogenní, mutagenní, teratogenní apod.) [1]. Výroba, zpracování, skladování, používání a převoz velkých objemů nebezpečných chemických látek (NCHL) tak představuje i určité riziko spojené se vznikem havárií. Při jejich nekontrolovatelném úniku může dojít k ohrožení zdraví a života lidí a k poškození životního prostředí. Ohroženy jsou i zasahující složky IZS, které se na likvidaci havárií podílejí. Riziko úniku NCHL však nemusí být spojeno pouze s hromadným postižením zdraví, ale jejich negativní účinky se mohou projevit i na jednotlivcích či malých skupinách, které s nimi nesprávně manipulují nebo nepoužívají ochranné pomůcky [2].

K únikům NCHL s rizikem hromadného postižení zdraví může dojít z různých důvodů. V případě selhání lidského faktoru se jedná o nekontrolovatelné havarijní úniky ve výrobě, při skladování anebo při přepravě NCHL po silnici či železnici. K úniku NCHL může dojít také vlivem přírodních jevů (povodně, vítr, sesuvy půdy) nebo při požárech, kdy hrozí intoxikace zplodinami emitovanými z požářiště. Při teroristických útocích nebo válečných konfliktech mohou být kromě běžných NCHL použity i bojové chemické látky (otravné látky), případně může dojít k poškození budov, v nichž se chemické látky vyrábějí, skladují nebo jinak používají. Nelze vyloučit ani úniky NCHL z potrubí, skládek i nelegálních skladů.

1 CHEMICKÉ HAVÁRIE

Z historie je známa řada chemických havárií spojených s úniky velkých množství NCHL. Tyto havárie, které měly řadu negativních dopadů na život a zdraví lidí, hospodářská zvířata, životní prostředí a majetek, zasáhly buď celá města, určité oblasti či jednotlivé složky životního prostředí [3]. Chemická havárie v indickém městě Bhópál (1984) je spojena s nejvyšším počtem lidských obětí. Požár agrochemického skladu v blízkosti švýcarského města Basileje (1986) způsobil rozsáhlé znečištění Rýna. Únik toxických látek z protržené hráze odkaliště úpravny rud poblíž rumunského města Baia Mare (2000) vážně ohrozil život v Dunaji. Výbuchy NCHL bylo poškozeno holandské město Enschede (2000), francouzské město Toulouse (2001) či americké městečko West (2013). Rovněž na území České a Slovenské republiky došlo k řadě chemických havárií, které naneštěstí měly mnohem menší negativní dopady.

U chemických havárií lze definovat dva významné zdroje ohrožení, které mohou zapříčinit vznik hromadných postižení zdraví. První jsou tzv. stacionární zdroje (objekty a zařízení), kde se NCHL vyrábějí, zpracovávají a skladují. Druhým zdrojem jsou jednotlivé druhy přepravy (transportu) těchto látek, tzv. mobilní zdroje. Z uvedeného vyplývá, že vznik chemické havárie lze očekávat především v místech, kde se NCHL skladují a kde jsou dislokovány závody chemického průmyslu, případně v místech dopravních úseků se zvýšenou četností nehod.

1.1 ZÁKLADNÍ HAVARIJNÍ PROJEVY

Každá chemická havárie je svými projevy specifická a rozsah jejích následků je obtížně předvídatelný, protože ho ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi hlavní faktory patří vlastnosti a množství uniklé NCHL, způsob a rychlost úniku, místo úniku, délka expozice zasažených osob, místní meteorologické podmínky či konfigurace terénu.

K základním havarijním projevům, ke kterým může dojít při vzniku chemické havárie, patří rozptyl toxické látky, požár a výbuch. Uvedené havarijní projevy mohou nastat samostatně nebo všechny najednou (např. následkem domino efektu), a vyznačují se specifickými zraňujícími účinky (tabulka 1).

Tabulka 1 Základní havarijní projevy chemických havárií a jejich dopady [4]

Havarijní projevy	Zraňující účinky	Stručná charakteristika havarijních dopadů
Rozptyl toxické látky	Toxicita a kontaminace	Ohrožení osob i na větší vzdálenosti, kontaminace ovzduší a/nebo vody a/nebo půdy, zpravidla nevýznamné materiální škody
Požár	Tepelné záření	Ohrožení osob v místě požáru, zapálení materiálů a/nebo destrukce materiálů, zpravidla vznikají značné materiální škody
Výbuch	Tlaková vlna, rozlet fragmentů a tepelné záření	Ohrožení osob v místě výbuchu, zasažení budov a/nebo konstrukcí a/nebo technologií (zničení, poškození), zpravidla vznikají značné materiální škody

Havarijní projevy NCHL jsou především závislé na jejich skupenství, ale i dalších fyzikálně-chemických vlastnostech látek. Zkušenosti ukazují, že velké havárie i menší provozní nehody přepravních a skladovacích zařízení, které obsahují toxické plynné látky anebo zkapalněné toxické plynné látky, mívají jedny z nejhorších dopadů na životy a zdraví lidí. Plynná NCHL těžší než vzduch po úniku do atmosféry vytváří oblak, který se v počáteční fázi šíří horizontálně při zemi a dostává se do prohlubní, sklepů, výkopů a dalších podzemních prostorů. Oblak může být zanesen ve směru vanutí přízemního větru do značných vzdáleností. Naopak plyny lehčí než vzduch stoupají vzhůru, ale jelikož se většinou skladují či přepravují ve zkapalněném nebo stlačeném stavu, v případě nekontrolovatelného úniku se okamžitě odpařují za vzniku těžké mlhy, která se chová po určitou dobu stejně jako plyn těžší než vzduch. Tento jev vyžaduje značné množství energie, která je odnímána z okolí což vede k prudkému snížení teploty v blízkosti havárie. Proto při haváriích nejsou neobvyklé omrzliny či křehnutí materiálů a ztráta jejich pevnosti (např. ochranné prostředky). Plyny těžší než vzduch mohou v podzemních prostorech ohrozit obyvatelstvo i v případě, že jejich toxicita je velmi nízká nebo prakticky žádná. Je známa řada případů, kdy netoxická látka, jako například dusík či oxid uhličitý, vnikla do podzemních prostorů, odkud vytěsnila vzduch [5]. V těchto případech pak nedochází k intoxikaci, ale k udušení osob a zvířat z důvodu nedostatku kyslíku.

Kromě rozptylu toxických NCHL dochází při chemických haváriích i k požárům a výbuchům. Jejich zraňující účinky, jako je tepelné záření a tlaková vlna, jsou většinou prostorově omezené (několik desítek metrů, výjimečně až stovek metrů) a jejich intenzita velmi rychle klesá s rostoucí vzdáleností. Naopak letící fragmenty se po výbuchu mohou v závislosti na velikosti skladovacího či přepravního kontejneru dostat až do vzdálenosti několika stovek metrů.

2 DISKUZE

Z hlediska havarijní připravenosti je mimořádně důležité poznat a správně pochopit procesy, které především determinují chování unikajících nebezpečných (především toxických) těžkých plynů. Obzvláště významná je tato znalost v případě havárie v intravilánech měst nebo v urbanizovaných územích. Zde mohou charakteristiky unikajícího plynu spolu s místními meteorologickými podmínkami významným způsobem ovlivnit způsob rozptylu dané látky, a tedy i rozsah konečných následků.

Pojmem těžký plyn se označuje plyn, který má vyšší molekulovou hmotnost než vzduch (28,96 g/mol), anebo se nachází ve stavu, kdy má oproti vzduchu významně vyšší hustotu (1,29 kg/m³). Do první z uvedených skupin lze zařadit například fluor, chlór, chlorovodík nebo ozon; druhá skupina pak může zahrnovat prakticky všechny plyny skladované pod vysokým tlakem nebo v kryogenním stavu – například fluorovodík, amoniak, kyslík, dusík a další. Uvedené plyny při svém úniku do atmosféry za specifických podmínek vytvářejí oblaky o relativní hustotě vyšší než je hustota okolního vzduchu, což vede k jejich klesání k zemskému povrchu (odtud název „těžký plyn“). Z pohledu termodynamiky se tyto plyny označují také jako negativně vznášivé.

Rozptyl těžkého plynu lze obecně rozdělit do několika fází (etap): emise ze zdroje, fáze mísení se vzduchem, klesavá fáze ovlivněná gravitací, přechodná fáze a pasivní rozptylová fáze (fáze vznášivého rozptylu). Je nutno podotknout, že během vzniku oblaku těžkého plynu nemusí vždy nastat všechny uvedené fáze [6].

K popisu chování těžkých plynů lze využít matematické modely, které se liší v úplnosti a způsobech popisu fyzikálních a chemických procesů probíhajících v průběhu rozptylu. Rovněž v typech úniků, při kterých je lze aplikovat, podle náročnosti požadavků na vstupní data a výpočetní techniku a podle požadavků na odborné znalosti uživatele. Ohledně posouzení přesnosti aplikovaných modelů je vždy nutné reflektovat, že dosažené výsledky mohou být ovlivněny nedostatky ve vstupních datech či charakterem atmosféry podléhající náhodným vlivům [7].

Matematické modely rozptylu těžkých plynů se rozdělují za použití různých kritérií. Rozšířená klasifikace podle Markiewiczze uvádí čtyři hlavní skupiny disperzních modelů pro těžké plyny: jednoduché – empirické modely, střední – integrální modely a modely mělké vrstvy (Shallow Layer Models), pokročilé – Lagrangeovské modely trajektorie částic a Lagrangeovské gaussovské modely a sofistikované – CFD modely. Ve skupině integrálních modelů lze dále rozlišit čtyři podskupiny: krabicové modely (box models), modely s ustálenou kouřovou vlečkou (Steady State Plume Models), zobecněné modely s ustálenou kouřovou vlečkou

(Generalised Steady State Plume Models) a jednorozměrové integrální modely kouřové vlečky (One Dimensional Integral Plume Models). CFD modely zahrnují RANS modely, LES modely a DNS modely [6,7].

Pokrok v modelování disperze těžkých plynů, který nastal v poslední dekádě, je připisován zejména RANS modelům. Pozornost byla zaměřena zejména na vývoj a testování nových modelů uzavřené turbulence (turbulence closure models). Je třeba zmínit i obnovený zájem o modely trajektorie Lagrangeovy částice (Lagrangian particle trajectory models) a modely mělké vrstvy (Shallow Layer Models). Modely prvních třech základních skupin a model RANS jsou důležitými praktickými nástroji vyhodnocování následků (dopadů) úniků nebezpečných plyných látek, naproti tomu ostatní CFD modely nachází využití spíše ve výzkumné oblasti. Jednoduché modely a středně pokročilé modely jsou důležitou součástí systému pro posouzení rizik a dopadu havárií a environmentálních studií [8]. Další autoři shodně uvádějí použití středně pokročilých modelů (např. ALOHA, HEGADAS, SCIPUFF) pro modelování mimořádných událostí v reálném čase. 2D modely přízemních vrstev (např. TWODEE, DISPLAY-2) jsou vhodné pro posouzení rizik, rekonstrukci minulých nehod a havarijní plánování, protože umožňují řešit složité terény. 3D modely jsou rovněž vhodné pro rekonstrukci dopadů minulých nehod a havárií a pro základní výzkum s validací různých parametrů [9].

Kvalita atmosférických modelů disperze těžkého plynu byla vždy důležitým tématem. Hodnocení kvality modelu lze chápat jako srovnání výsledků modelu s výsledky přímých měření (laboratorních či terénních experimentů). Tato srovnání obvykle provádí autoři modelů a obvykle se jedná o jediný model. V některých případech jsou matematické disperzní modely testovány i jinými výzkumnými týmy, než přímo autory modelu, případně modelové předpovědi disperze těžkých plynů jsou porovnány s výsledky jiných matematických modelů na místo reálných měření.

Procesy pro hodnocení kvality modelu obvykle obsahují tři hlavní části: vědecké hodnocení, verifikace modelu, validace modelu [7]. Tento obecně uznávaný přístup je rovněž uplatňován při vývoji modulu DEGAS, který je určený pro modelování šíření těžkého plynu za různých povětrnostních podmínek, a který bude implementován do expertního systému TerEx. Řešení projektu předpokládá ověření modelu pro rozptyl těžkého plynu prostřednictvím terénních zkoušek a srovnávacích (verifikačních) testů. Výsledkem projektu bude vyvinutý modul, který bude určený pro predikci dosahu zraňujících koncentrací plyných látek a disperzí těžších než vzduch, které představují zejména v urbanizovaných a hustě osídlených oblastech významnou hrozbu.

ZÁVĚR

Ke zmírnění nebo k preventivní přípravě ochrany obyvatelstva, je nutné mít znalosti k odhadnutí průběhu chemické havárie. Jedním z prostředků jsou moderní modelovací softwarové nástroje, které napomáhají predikovat šíření, dopady a průběh chemických havárií. Na základě výsledků takového modelování je možné přijmout řadu různých organizačních a bezpečnostních opatření (preventivního, represivního, ochranného, záchranného a likvidačních charakteru) ke zvýšení připravenosti a snížení

ohrožení obyvatelstva a životního prostředí. Z tohoto důvodu je nutné se zabývat vývojem dostupných a přitom relativně přesných modelovacích softwarových nástrojů, které budou sloužit především jako nástroje pro prognostické modelování a predikci šíření a dosahu látek ohrožujících zdraví obyvatelstva při haváriích technologických zařízení.

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury České republiky v rámci řešení projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje č. TH01031098 – „Validace a verifikace modelu šíření a disperze těžkého plynu za specifických situací (DEGAS)“.

LITERATURA

- [1] ŠTĚTINA, Jiří et al. Zdravotnictví a integrovaný záchranný systém při hromadných neštěstích a katastrofách. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a. s., 2014. 584 s. ISBN 978-80-247-4578-7.
- [2] ŠAFR, Gustav et al. Ochrana obyvatelstva v případě krizových situací a mimořádných událostí nevojenského charakteru II. 1. vyd. Brno: Tribun EU, s. r. o. 2014. 304 s. ISBN 978-80-263-0724-2.
- [3] ČAPOUN, Tomáš et al. Chemické havárie. 1. vyd. Praha: MV-generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2009. 149 s. ISBN 978-80-86640-64-8.
- [4] MIKA, Otakar J. a POLÍVKA, Lubomír. Radiační a chemické havárie. 1. vyd. Praha: Policejní akademie ČR. 2010. 169 s. ISBN 978-80-7251-321-5.
- [5] LACINA, Petr et al. Nebezpečné chemické látky a směsi. 1. vyd. Brno: Litera Brno. 2013. 131 s. ISBN 978-80-210-6475-1.
- [6] MARKIEWICZ, M. T. A Review of the Mathematical Models for the Atmospheric Dispersion of Heavy Gases. Part I. Ecol. Chem. Eng. S. 2012;19(3):297-314.
- [7] MARKIEWICZ, M. T. A Review of the Mathematical Models for the Atmospheric Dispersion of Heavy Gases. Part II. Ecol. Chem. Eng. S. 2013;20(4):763-782.
- [8] KASHI, E.; SHAHRAKI, F.; RASHTCHIAN, D.; BEHZADMEHR, A. Temperature Gradient and Wind Profile Effects on Heavy Gas Dispersion in Build up Area. Australian J. of Basic and Applied Sciences 2010; 4(12):6010-6020.
- [9] KOVALETS, I.V.; MADERICH, V.S. Numerical Simulation of Interaction of the Heavy Gas Cloud with the Atmospheric Surface Layer. Environmental Fluid Mechanics 2006;6:313-340.