

## PREDIKCE VZNIKU A ŠÍŘENÍ TĚŽKÉHO PLYNU PŘI CHEMICKÝCH HAVÁRIÍCH

**PETR A. SKŘEHOT<sup>a</sup>, JAKUB MAREK<sup>a</sup>,  
FRANTIŠEK HOUSER<sup>a</sup>, ZDENĚK HON<sup>b</sup>,  
MARTIN STANĚK<sup>b</sup>, MICHAELA MELICHAROVÁ<sup>c</sup>,  
ZBYNĚK JAŇOUR<sup>d</sup> a PETER KORBA<sup>e</sup>**

<sup>a</sup> *Znalecký ústav bezpečnosti a ochrany zdraví, z.ú., Ostravského 253/3, 150 00 Praha 5,* <sup>b</sup> *Fakulta biomedicínskeho inženýrství, České vysoké učení technické v Praze, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno,* <sup>c</sup> *T-SOFT a.s., U Zásobní zahrady 2552/1a, 130 00 Praha 3,* <sup>d</sup> *Ústav termomechaniky, AV ČR, v. v. i., Dolejškova 1402/5, 182 00 Praha 8, Česká republika,* <sup>e</sup> *Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Rampová 7, 041 21 Košice, Slovensko*  
skrehot@zuboz.cz

Došlo 27.3.19, přijato 24.5.19.

Klíčová slova: nebezpečné látky, těžký plyn, chemické havárie, modely

### Obsah

1. Úvod
2. Těžký plyn
3. Mechanismus rozptylu těžkého plynu
4. Ověření rozptylu těžkého plynu za reálných podmínek
5. Model SLAB-DEGAS
6. Závěr

### 1. Úvod

Rozvoj lidské společnosti a s ním spojená vzrůstající intenzita aktivit na poli průmyslové výroby i dopravy vedou k vážným dopadům na stav životního prostředí, zejména pak na znečištění ovzduší. Markantně se to projevuje především v průmyslových aglomeracích, ve městech a jejich okolích. Pro vyspělou civilizaci se tento problém stává problémem univerzálním, nezávislým na specifických podmínkách (geografických, morfologických a jiných). Kromě hlavních zdrojů tzv. „kontinuálního“ antropogenního znečištění, kterými jsou průmysl, doprava nebo lokální topeniště, se stále více uplatňují také zdroje spojené s nejrůznějšími haváriemi. Mezi tyto události patří zejména úniky chemických látek z výrobních či přepravních zařízení nebo rozsáhlé průmyslové požáry. Bohužel, dlouhodobé statistiky ukazují, že jejich četnost i závažnost neustále roste<sup>1,5,7</sup>. Ovšem není to pouze důsledkem zvyšování

jícího se objemu chemické výroby, těžby surovin (zejména ropy a plynu) nebo množství přepravovaných nebezpečných látek. Podstatný vliv má také urbanizace. V důsledku přirozené migrace lidí z venkova do měst a s tím spojené výstavby založené často na nekonceptním územním plánování totiž roste počet lidí, kteří se vyskytují (žijí nebo pracují) v potenciálně ohrožených oblastech. Zmíněný problém má tedy hlubší podstatu, avšak z pohledu chemika je jistě klíčová především první z uvedených dimenzí. Ostatně jsou to právě průmysloví chemici a procesní inženýři, kteří se posledních třicet let intenzivně zabírají novými výzvami zaměřenými na předcházení chemickým haváriím. Dnes tuto oblast nazýváme prevencí závažných havárií nebo také „Loss Prevention“. Zdrojem inspirace mohou být na straně jedné havárie, které se staly v minulosti, na straně druhé nové poznatky získané výzkumem a experimentální činností. Snahou odborníků přitom je co možná nejlépe pochopit procesy, které vznik havárií, jejich průběh a následky ovlivňují.

### 2. Těžký plyn

Ve spektru těchto problémů už dlouhou dobu vyniká jeden, který stále není uspokojivě vyřešen. Jedná se o predikci šíření (rozptylu) těžkých plynů v reálné atmosféře. Především pak při nehodách, kdy dochází k uvolnění velkého množství určité chemické látky do malého prostoru a v relativně krátkém čase, se dostáváme do situací, kdy se v blízkosti zdroje úniku (řádově desítky až stovky metrů) vyskytují velmi vysoké koncentrace dané látky. Ty lze přitom jen velmi obtížně predikovat, neboť jde o hodnoty v řádu statisíců ppm, což je pro běžného chemika jen stěží představitelné.

Tato komplexní problematika proto kromě technického přístupu vyžaduje také znalosti fyzikální chemie, fyziky atmosféry a numerických metod. Integrace poznatků z těchto disciplín je pak nezbytným předpokladem pro úspěšné modelování možných havarijních scénářů. V reálné atmosféře totiž rozptyl polutantů ovlivňuje řada faktorů, které se vzájemně ovlivňují, čímž vzniká soustava vyznačující se složitými fyzikálními vztahy. Pro úspěšné řešení tohoto úkolu je nutné daný problém zjednodušit definováním omezeného počtu klíčových paradigmat. Na prvním místě jde o samotný charakter rozptylu uvažované látky v atmosféře, tedy mísení malého množství jednoho plynu v prostředí tvořeném druhým plynem. Ve skutečnosti je tento proces determinován relativní hustotou rozptylovaného plynu vůči vzduchu za daného tlaku a teploty<sup>2</sup>. Je-li hustota oblaku rozptylované látky větší než hustota vzduchu, má rozptylovaná látka tendenci vytvářet kompaktní oblak, který se drží při zemi. Pakliže se neuplatňují síly

způsobující jeho naředování okolním vzduchem (tj. turbulence), pak se s okolním vzduchem promíchává jen málo a pomalu (prakticky pouze uplatněním molekulární difuze)<sup>1</sup>. V takovém případě hovoříme o těžkém plynu (v termodynamice se používá alternativní označení „negativně vznášivý plyn“). Naopak v případě, že má rozptýlovaný plyn hustotu výrazně menší než vzduch, má tendenci stoupat vzhůru a jeho rozptýl se odehrává ve vyšších vrstvách atmosféry (tzv. vznášivý plyn). Pokud má hustotu přibližně stejnou jako okolní vzduch, pak dochází k poměrně rychlému promísení s okolním vzduchem. Seznam vybraných plynů, jejich charakteristik a popis chování při úniku je uveden v tab. I.

Z fyzikálního hlediska je za těžký plyn možné považovat nejen takový plyn, který má vyšší molekulovou hmotnost než vzduch ( $28,96 \text{ g mol}^{-1}$ ), ale také plyn nacházející se ve stavu, kdy má oproti vzduchu ( $1,29 \text{ kg m}^{-3}$ ) významně vyšší hustotu. V průmyslové praxi je první z uvedených skupin zastoupena např. fluorem, chlorem, chlorovodíkem, ozonem, fosgenem nebo oxidem uhličitým. Druhá skupina pak může zahrnovat prakticky všechny plyny skladované pod vysokým tlakem nebo v kryogenním stavu – např. fluorovodík, amoniak, kyslík, dusík atd.<sup>3</sup>

Podle evropské databáze MARS<sup>5</sup> byla téměř polovina všech evidovaných průmyslových havárií spojena s úniky

Tabulka I  
Seznam vybraných látek a jejich vlastností za pokojové teploty<sup>4</sup>

Látka	Vzorec	Relativní hustota	Chování při úniku	Teplota varu [°C]
Vodík	H <sub>2</sub>	0,07	vznášivý plyn	-253
Helium	He	0,14	vznášivý plyn	-269
Metan	CH <sub>4</sub>	0,55	vznášivý plyn	-162
Amoniak	NH <sub>3</sub>	0,59	vznášivý plyn	-33
Fluorovodík	HF	0,69	vznášivý plyn	19
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,90	vznášivý plyn	-84
Kyanovodík	HCN	0,93	neutrální plyn	26
Oxid uhelnatý	CO	0,97	neutrální plyn	-192
Dusík	N <sub>2</sub>	0,97	neutrální plyn	-196
Ethylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,97	neutrální plyn	-104
Formaldehyd	HCNO	1,04	neutrální plyn	-21
Oxid dusnatý	NO	1,04	neutrální plyn	-152
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,04	neutrální plyn	-89
Kyslík	O <sub>2</sub>	1,10	těžký plyn	-183
Fosfan	PH <sub>3</sub>	1,17	těžký plyn	-88
Sirovodík	H <sub>2</sub> S	1,18	těžký plyn	-60
Chlorovodík	HCl	1,26	těžký plyn	-85
Fluor	F <sub>2</sub>	1,31	těžký plyn	-188
Propylen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,45	těžký plyn	-48
Etylenoxid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	1,52	těžký plyn	11
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	1,52	těžký plyn	-79
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,52	těžký plyn	-42
Oxid dusičitý	NO <sub>2</sub>	1,59	páry	21
Metylchlorid	CH <sub>3</sub> Cl	1,74	těžký plyn	-24
n-butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,01	těžký plyn	-1
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	2,21	těžký plyn	-10
Chlor	Cl <sub>2</sub>	2,45	těžký plyn	-34
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2,70	páry	80
Bromovodík	HBr	2,79	těžký plyn	-67
Fosgen	COCl <sub>2</sub>	3,41	těžký plyn	8

látek do ovzduší, přičemž v 97 % z těchto případů došlo k vytvoření oblaku těžkého plynu<sup>6</sup>. Nejčastěji se jednalo o úniky amoniaku, chloru a chlorovodíku, což jsou látky velmi reaktivní a toxické. Srovnatelná čísla nabízí také francouzská databáze ARIA, která obsahuje hlášení o více než 46 000 nehodách<sup>7</sup>.

Vznik oblaku těžkého plynu závisí především na fyzikálně-chemických vlastnostech unikajícího plynu a na podmínkách, za kterých je tento plyn skladován. V tomto smyslu hraje největší roli rozdíl tlaku mezi jednotlivými prostředími (tj. tlak uvnitř zařízení, resp. tlak volné atmosféry, kam plyn uniká). U plynů skladovaných pod vysokým tlakem se během jejich úniku uplatňuje Jouleův-Thomsonův jev, který způsobuje jejich ochlazení. Vysvětlení Jouleova-Thomsonova jevu bezprostředně souvisí s existencí mezimolekulárních sil (van der Waalsových). Při expanzi plynu totiž dochází ke změnám vzdáleností mezi molekulami, k čemuž je nutno vykonat práci působící proti silám, které se snaží udržet molekuly co nejbližší u sebe<sup>3</sup>. Vznik těžkého plynu dále ovlivňuje i hmotnostní rychlost úniku a charakteristiky úniku (např. velikost unikového otvoru). Jedná-li se o intenzivní kontinuální únik (např. typu „jet“), anebo o jednorázový únik velkého množství, má plyn tendenci okamžitě se rozepnout do okolního prostoru. Jelikož ale expanduje do reálné atmosféry a nikoli do vakua, dochází nejen k překonávání účinku mezimolekulárních van der Waalsových sil (viz výše), ale také odporu, který mu okolní vzduch klade. Tento odpor vzniká jednak v důsledku turbulentního tření na čele rozšiřující se „bublina“ plynu a jednak v důsledku existence atmosférického tlaku, který nutí unikající plyn konat objemovou práci (plyn vlastně zdvihá atmosféru nad ním). Z tohoto důvodu unikající plyn zaujme menší objem, než by tomu bylo ve vakuu, díky čemuž nabyde vůči vzduchu i výrazně vyšší relativní hustotu<sup>3</sup>. Při velkém počátečním tlaku (řádově desítky až stovky MPa) se unikající plyn může ochladit až o desítky stupňů. Největší ochlazení nastává tehdy, když plyn uniká přes malý otvor (např. únik typu „jet“) nebo přes pórovitou přepážku<sup>8</sup>.

Tím, jak unikající plyn vtéká do atmosféry, vytváří ostře ohraničenou chladnou „bublinu“, která působením gravitační síly klesá k zemskému povrchu. Nepůsobí-li na ni současně i turbulentní větrné proudění, rozlévá se postupně do stran a vytváří přízemní vrstvu, popř. „zatéká“ do nejrůznějších prohlubní. V takovém případě se „bublina“ s okolním vzduchem prakticky nemísí, neboť díky jejím odlišným teplotním charakteristikám nad ní vzniká lokální teplotní inverze<sup>9</sup>. Je-li dotace látky během úniku skutečně velká a úbytek tepla rychlý, což nastává zejména při dvoufázovém úniku zkapalněných plynů nebo při únicích typu „jet“, dochází současně ke vzniku disperze. Disperze představuje aerosol tvořený viditelným shlukem drobných, okem nerozeznatelných kapiček (např. při úniku zkapalněného kyslíku, dusíku nebo amoniaku) nebo krystalků (např. při úniku stlačeného oxidu uhličitého)<sup>2</sup>. Tento oblak je pozorovatelný tehdy, je-li jeho hustota alespoň o 1 % vyšší než hustota vzduchu<sup>10</sup>. Efekt tvorby viditelného oblaku v průběhu úniku pozvolna ustává, do-

kud nedojde k vyprázdnění zásobníku a vyrovnání jeho vnitřního tlaku s tlakem atmosférickým.

Z praxe je známo, že jako těžké plyny se někdy chovají i kouřové vlečky vznikající při velkých požárech zásobníků s ropnými látkami, které obsahují směs sazí, kapiček aerosolu a plynných produktů hoření<sup>12</sup>. Tyto oblaky mají zprvu tendenci stoupat vzhůru, ale následně, po svém ochlazení, postupně klesají zpět k zemskému povrchu. Toto chování kouřových vleček bylo pozorováno jak při velkých požárech ropných terminálů (např. v anglickém Buncefieldu v roce 2005, v Porto Ricu v roce 2009 nebo v Amauy ve Venezuele v roce 2012), tak i při požárech menších zásobníků obsahujících letecké palivo (např. na Stapletonově letišti v Denveru v roce 1990 nebo na letišti v Miami v roce 2011). Tyto události pochopitelně působí nejen značné materiální a ekologické škody, ale také velké problémy v letecké dopravě.

### 3. Mechanismus rozptylu těžkého plynu

Jak již bylo uvedeno, typickou vlastností těžkých plynů je, že po svém vzniku klesají k zemskému povrchu, podél něhož se šíří a postupně se rozptylují. Za klidného počasí a při relativně rovnom, nepřilíš zdrsňeném povrchu se proudění („tečení“) těžkého plynu podél zemského povrchu blíží laminárnímu. Tato situace ale ve skutečnosti nastává zcela ojediněle, neboť v reálné atmosféře se vždy určitým způsobem uplatňují vlivy způsobující turbulence. Turbulentní proudění představuje poměrně složitou strukturu pohybu jednotlivých částic, kdy se jejich proudnice často vzájemně „proplétají a mísí“, a to zpravidla s výraznou časovou proměnlivostí až chaotičností<sup>13</sup>. K tomu, aby proudění nabylo turbulentního charakteru, musí poměr v něm působících setrvačných sil k silám vazkým (vznikajících působením tření mezi proudícím plynem a okolním vzduchem), resp. silám odporovým (vznikajících působením tření mezi proudícím plynem a zemským povrchem) překročit jistou kritickou hodnotu<sup>14</sup>. Tento poměr je popsán tzv. bezrozměrným Reynoldsovým číslem.

V první fázi (tj. již během úniku plynu a následného vzniku disperze) se nejvíce uplatňuje gravitace. Plyn klesá k zemi („sesedá“) a snaží se energeticky stabilizovat. V druhé fázi, během které se rozšiřuje („teče“) podél zemského povrchu, se postupně začínají uplatňovat odporové a vazké síly. Někteří autoři uvádí, že za bezvětří je při fázi „tečení“ účinek turbulentní difuze překonán účinky gravitace, která se projevuje laterálním šířením těžkého plynu<sup>15</sup>. Oblak se tedy rozšiřuje (roztéká) do stran podobně jako kapalina rozlita na podložku. Tento efekt se vysvětluje tak, že při rozšiřování oblaku do stran dominují tíhové a vztlakové síly, zatímco vliv turbulence se uplatňuje spíše při šíření oblaku ve směru převažujícího proudění nebo ve vertikálním směru. Má-li navíc oblak stabilní teplotní stratifikaci, dochází k potlačení turbulentního proudění až o 20 %. Oblak se tak drží při zemi a jeho povrch je více méně hladký. To se pozitivně projevuje nakonec i v rychlosti větru ve vrstvě nacházející se bezprostředně nad oblakem.

Průměrná rychlost větru v této vrstvě je až 1,3krát vyšší než v případě, kdy oblak stabilní stratifikaci nemá<sup>15</sup>. V reálných podmínkách se oblak spíše začne promíchávat („víř“ a) a naředovat s okolním vzduchem, který do něj proniká. Tuto fázi ovlivňuje jak rychlost šíření oblaku podél povrchu (daná hybností získanou při úniku ze zařízení a působením gravitační síly v případě nerovného povrchu), tak i účinky proudícího vzduchu nebo přirozené termické konvekce<sup>16</sup>. Pro svou chaotičnost je tato fáze rozptylu jen velmi obtížně popsitelná. Pro určitou aproximaci se používají Navierovy a Stokesovy pohybové rovnice<sup>14</sup>. Konečně třetí fázi rozptylu je pak úplné naředění těžkého plynu vzduchem, tj. jeho splynutí s okolní atmosférou. Zde se uplatňují zejména síly dynamické způsobené mechanickými účinky větru a v menší míře pak i difuze působící ve směru koncentračního gradientu. Tuto fázi rozptylu nejvíce ovlivňují panující povětrnostní podmínky, kdy podstatný vliv má zejména hodnota vertikálního teplotního gradientu v mezní vrstvě atmosféry<sup>9</sup>.

Jakmile se hustota plynu přiblíží hustotě okolního vzduchu (tj. při dosažení objemové koncentrace cca 10 000 ppm), rozptyluje se pasivním způsobem<sup>16</sup>. Pasivní nebo též pozitivně vztlávací rozptyl popisuje gaussovský model navržený Suttonem<sup>17</sup>. V gaussovských modelech představuje rychlost větru a turbulence hlavní faktory ovlivňující pohyb molekul uvolněného plynu, takže plyn se šíří ve směru větru a postupně se promíchává se vzduchem, popř. pozvolna stoupá vzhůru. Koncentrační profil rozptylující se látky má podobu Gaussovy křivky (odtud zobecněný název pro tento model), jehož šířka je závislá na rozptylu dané látky a je popsána směrodatnými odchylkami (tzv. rozptylovými koeficienty). Platí, že čím širší tato křivka je, tím výrazněji se rozptyl uplatnil.

#### 4. Ověření rozptylu těžkého plynu za reálných podmínek

Simulaci rozptylu těžkého plynu se v nedávné minulosti věnovalo několik výzkumů, z nichž některé vedly k zajímavým novým poznatkům. Byly provedeny jak numerické srovnávací studie (např. cit.<sup>9,18,19</sup>), tak i řada menších ověřovacích testů. V USA byly realizovány také náročné experimentální programy, jakými byly např. Maplin Sands Tests (r. 1981 a 1984), Goldfish Test Series (r. 1986 a 1988), Fladis (r. 1997) nebo Jack Rabbit Test Program (r. 2010)<sup>20</sup>. Ani v České republice nejsme v tomto ohledu pozadu. V letech 2007 a 2008 byly na letišti v Ústí nad Labem prováděny dvě série testů SPREAD (simulace okamžitého úniku disperze)<sup>21</sup> a v letech 2016 a 2017 pak dva terénní experimenty DEGAS (simulace kontinuálního úniku ze zásobníku), které se odehrály na vojenském letišti v Bechyni<sup>22</sup>. V dřívějších letech byly provedeny také další experimenty, jako např. zkoušky v pražském metru (r. 2011) nebo na Staroměstském náměstí v Praze<sup>23</sup>.

Při plánování terénních testů zaměřených na studium rozptylu těžkých plynů v atmosféře, tedy míchání dvou tekutin o různých vlastnostech, je na prvním místě nutné

zohlednit počáteční podmínky zdroje úniku. Proto se terénní testy výrazně liší od experimentů prováděných v laboratorních podmínkách ve větrných tunelech, neboť pracujeme v reálném a nikoli zkresleném měřítku. Díky tomu lze získávat relevantní data o tom, jak se daný systém chová za reálných (tj. nikoli ideálních) podmínek, což je nedílný požadavek pro potvrzení či vyvrácení ověřované hypotézy. Kromě roviny vědecké jsou terénní experimenty důležité také pro získání poznatků o uplatnění nejrůznějších vnějších podmínek na zkoumaný systém a taktéž k získání cenných praktických zkušeností výzkumného týmu. Úspěšná realizace terénních experimentů nicméně vyžaduje pečlivé logistické a organizační plánování, bezchybnou koordinaci činností a v neposlední řadě vysoké osobní nasazení jednotlivých účastníků (tj. spolehlivost, odpovědnost, zručnost a dobrou tělesnou kondici).

#### 5. Model SLAB-DEGAS

Jak již bylo zmíněno, v rámci projektu DEGAS byly provedeny dva terénní testy. První byl validační a sloužil k ověření metodiky provádění experimentu, druhý pak představoval „ostrý“ test. Použit byl mobilní tlakový zásobník s celkovým obsahem 6000 kg zkapalněného CO<sub>2</sub>. Oxid uhličitý je při normální teplotě (+15 °C) a při atmosférickém tlaku 1,52krát těžší než vzduch, takže se chová jako těžký plyn. Jelikož se jedná o běžně dostupný technický plyn, lze jej snadno pořídit ve velkém množství a za relativně nízké náklady. Pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> byly použity přenosné přístroje s infračervenými senzory fungujícími na principu NDIR schopné měřit okamžitou koncentraci s integrační dobou 1 s. Ačkoli se jednalo o velice zajímavé experimenty, není v rámci tohoto článku prostor k jejich podrobnějšímu popisu. Případné zájemce proto odkazujeme na veřejně dostupné práce, v nichž jsou tyto testy detailně prezentovány, a to včetně bohaté fotodokumentace (viz cit.<sup>20,22</sup>).

Účelem testů DEGAS bylo získat praktické poznatky o šíření těžkých plynů v reálné atmosféře pro potřeby rozšíření softwarového modelovacího nástroje TEREX (TERoristický Expert) o nový výpočetní modul. Jeho základem je rozptylový model SLAB, který vyvinula americká Lawrence Livermore National Laboratory<sup>24</sup>. Ten dokáže modelovat šíření těžkého plynu pro několik možných scénářů úniku – jednorázový (okamžitý) únik, kontinuální únik, horizontálně nebo vertikálně orientovaný tryskový únik („jet“) a odpařování z kaluže. Matematický aparát modelu SLAB je založen na řešení šesti jednorozměrných diferenciálních rovnic zahrnujících výpočet hybnosti ve třech směrech ( $x, y, z$ ), bilance hmoty, energie a skupenského stavu unikající látky v čase. Výsledné hodnoty jsou pak prostorově průměrovány, a to s přihlédnutím ke vstupním parametrům zdroje úniku. SLAB bere v úvahu také uplatnění gravitační síly, turbulentního promíchávání, difuze, tření postupujícího oblaku o zemský povrch a stav atmosféry (tj. výškového teplotního gradientu) v závislosti na horizontální advekcii teploty a relativní vlhkosti vzduchu<sup>24,25</sup>.

Testy DEGAS nesporně přinesly řadu nových poznatků a zkušeností<sup>22</sup>. Kupříkladu se prokázalo, že dosahy zraňujících koncentrací použitého stopovače nebyly zdaleka tak velké, jak predikoval původní model SLAB. Výsledky získané těmito experimenty proto posloužily k odvození korekční rovnice, která výpočet modelu SLAB výrazně zpřesnila. Tento verifikovaný model označovaný jako SLAB-DEGAS byl následně implementován do modelovacího nástroje TEREX.

## 6. Závěr

Život naší společnosti není bez nebezpečných látek už takřka představitelný. Všude tam, kde se s takovými látkami nakládá, ale logicky hrozí i možné nehody. S těmito riziky sice musíme počítat, ale rozhodně je nesmíme přimnout bez snahy je omezit. Zajištění ochrany zdraví lidí ale i životního prostředí před nežádoucími účinky chemických havárií nesporně patří k prioritním úkolům chemického inženýrství. Každé účinné opatření musí být založeno na dokonalých znalostech vlastností jednotlivých látek. Kupříkladu dnes už víme, že chování různých plynů po jejich úniku do atmosféry je rozličné a závisí na mnoha faktorech. Zvláštní skupinou jsou tzv. těžké plyny, s nimiž se při chemických haváriích můžeme setkávat takřka v polovině případů. Popis jejich šíření v reálné atmosféře nicméně představuje poměrně složitý fyzikální problém. Běžné numerické modely tyto události většinou simulovat neumožňují, a pokud ano, pak je jejich výpočet zatížen významnou chybou. Úkolem odborníků proto je navrhovat realistické modely, které budou validované na základě poznatků získaných při ověřovacích testech. Pouze takové nástroje mohou nalézt uplatnění v praxi, ať již u bezpečnostních inženýrů, tak i záchranářů podílejících se na likvidaci případných nehod. Jedním z takových modelů je i SLAB-DEGAS, který představuje verifikovanou modifikaci původního modelu SLAB a který byl vytvořen v českých podmínkách.

*Vypracováno s finanční podporou Technologické agentury ČR v rámci projektu č. TH01031098 „Validace a verifikace modelu šíření a disperze těžkého plynu za specifických situací (DEGAS)“.*

## LITERATURA

1. Lees F.: *Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 1., 2. vyd. Butterworth-Heinemann, Oxford 1996.
2. Skřehot P. A. (ed.): *Prevence nehod a havárií: 2. díl: mimořádné události a prevence nežádoucích následků*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce a T-SOFT, Praha 2009.
3. Hon Z., Staněk M., Skřehot P. A., Melicharová M., Fröhlich T., Marek J.: *22. medzinárodná vedecká konferencia Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí*, str. 116, Fakulta bezpečnostného inžinierstva UNIZA, Žilina 2017.
4. Dräger Safety AG & Co.: *Gas Dispersion*. [http://www.draeger.com/sites/assets/PublishingImages/Segments/ES/Oil-Gas-Industry/Plant-Safety-Operations/gas\\_dispersion\\_br\\_9046434\\_en.pdf](http://www.draeger.com/sites/assets/PublishingImages/Segments/ES/Oil-Gas-Industry/Plant-Safety-Operations/gas_dispersion_br_9046434_en.pdf), staženo 15. 2. 2019.
5. *The EU Major Accident Reporting System – eMARS*. [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/teia/doc/COP-7/10.5\\_EMARS.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/teia/doc/COP-7/10.5_EMARS.pdf), staženo 1. 3. 2019.
6. Vilches J. A., Sevilla S., Montiel H., Casal J.: *J. Loss Prev. Process Ind.* 8, 87 (1995).
7. BARPI: *Analysis, Research and Information on Accidents (ARIA)*. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>, staženo 15. 2. 2019.
8. Kolafa J.: *O vypouštění vzduchu z pneumatiky*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/kolafa/pneu.pdf>, staženo 26. 1. 2019.
9. Skřehot P. A., Marek J., Skřehotová M., Pišala J.: *Aktuálne otázky bezpečnosti práce 2015*, str. 76, Technická univerzita v Košiciach, Štrbské Pleso 2015.
10. Dohányosová P., Kubincová L., Smolík J., Schwarz J., Ždímal V.: *Výkladový slovník aerosolových termínů*. Česká aerosolová společnost, Praha 2007.
11. Speight J. G.: *Handbook of Petroleum Product Analysis*. CD & W Inc., Laramaine 2015.
12. Rauchegger C., Bayley S., Schröder V., Thévenin D.: *Process Safety Progress* 34, 280 (2015).
13. Skřehot P. A., Marek J., Skřehotová M., Paučová V.: *Bezpečnost a ochrana zdraví při práci*, str. 91, SPBI, Ostrava 2016.
14. Bednář J., Brechler J., Fuka V.: *Vesmír* 91, 498 (2012).
15. Kovalets I. V., Maderich V. S.: *Environ. Fluid Mech.* 6, 313 (2006).
16. U.S. EPA. *ALOHA 5.4.4 Technical Documentation*. 2013.
17. Bednář J., Zikmunda O.: *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Academia, Praha 1985.
18. Mokhtarzadeh-Dehghan M. R., Akcayoglu A., Robins A. G.: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 110, 10 (2012).
19. Donat J., Schatzmann M.: *J. Wind. Eng.* 83, 361 (1999).
20. Skřehot P. A. (ed.): *Rozptyl těžkého plynu v atmosféře*. T-SOFT, Praha 2018.
21. Havlová-Melicharová M., Skřehot P. A.: *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti*, 3 (2008), <https://www.bozpinfo.cz/josra/overeni-modelu-sireni-projevu-ucinku-ohrozujujicich-udalosti-projekt-spread-0>, staženo 18. 1. 2019.
22. Skřehot P. A., Marek J., Melicharová M., Hon Z., Civiš M.: *Aktuálne otázky bezpečnosti práce*, str. 92, Technická univerzita v Košiciach, Štrbské Pleso 2017.
23. Klouda K.: *Rizika podzemních staveb: a něco málo navíc*. SPBI, Ostrava 2010.
24. Ermak D. L.: *User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases*. UCRL-MA-105607. Lawrence Livermore National Laboratory (1990).

25. Zapert J. G., Londergan R. J., Thistle H.: *Evaluation of Dense Gas Simulation Models*. EPA-450/4-90-018. U.S. EPA (1991).

**P. A. Skřehot<sup>a</sup>, J. Marek<sup>a</sup>, F. Houser<sup>a</sup>, Z. Hon<sup>b</sup>, M. Staněk<sup>b</sup>, M. Melicharová<sup>c</sup>, Z. Jaňour<sup>d</sup>, and P. Korba<sup>e</sup>** (<sup>a</sup>*Occupational Safety and Health Expert Institute, Prague*, <sup>b</sup>*Czech Technical University, Prague*, <sup>c</sup>*T-SOFT, Prague*, <sup>d</sup>*Institute of Thermomechanics of the CAS, Prague, Czech Republic*, <sup>e</sup>*Technical University Košice, Košice, Slovakia*): **Prediction of Formation and Spread of Dense Gas during Chemical Accidents**

The development of human society, the increasing intensity of industrial production and transport activities associated with it have led to serious environmental impacts, especially air pollution. In addition to the common sources of emissions, various accidents also increasingly occur, including chemical leaks from production or transport facilities or large-scale industrial fires. Therefore,

over the last thirty years, great efforts have been made to prevent chemical accidents. The key concern here is to understand the processes that affect the emergence and course of accidents as deeply as possible. One of the topics intensively studied in this context is the diffusion of heavy gas in a real atmosphere. This is a phenomenon with potentially very serious consequences; however, it is not easy to describe it physically and chemically. The dispersion of gas heavier than air is a complex process, determined by a number of various factors. Therefore, experts make efforts to understand this problem better, to gain new knowledge and to gradually refine existing dispersion models. One of such models is SLAB-DEGAS, which is a verified modification of the original SLAB model, created under Czech conditions.

Keywords: hazardous substances, dense gas, chemical accident, models

*Acknowledgements*

*This work was supported by grant TH01031098 from the Technology Agency of the Czech Republic.*