



TERÉNNÍ TESTY REALIZOVANÉ V RÁMCI VÝVOJE VALIDNÍHO ROZPTYLOVÉHO MODELU URČENÉHO PRO PREDIKCI ŠÍŘENÍ TĚŽKÉHO PLYNU

Zdeněk Hon ¹, Martin Staněk ², Petr Adolf Skřehot ³,
Michaela Melicharová ⁴, Tomáš Fröhlich ⁵, Jakub Marek ⁶

ABSTRAKT

V rámci výzkumného projektu DEGAS, který se zabývá vývojem softwarového nástroje určeného pro modelování šíření těžkého plynu za specifických situací, byly provedeny terénní testy, jejichž výsledky umožňují validovat použitý rozptylový model, který byl navržen v projektu. Cílem projektu je přispět k pochopení chování některých těžkých plynů při jejich havarijním úniku a navrhnout spolehlivý rozptylový model. Tento model následně ověřit v reálných podmínkách únikem CO₂ a měřením odezvy pomocí detektorů v prostoru a čase. Příspěvek shrnuje průběh ostrých terénních testů a následný způsob vyhodnocení experimentálních dat.

Klíčová slova:

těžký plyn, terénní testy, modelování, software.

ABSTRACT

Within the DEGAS research project, which is concerned with the development of a software tool for modeling the spread of heavy gas in specific situations, field tests were carried out which results allow the validation of the dispersion model, which was designed in the project. The aim of the project is to contribute to the understanding of

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. Martin Staněk, ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno; tel.: + 420 224 359 973, email: stanema4@fbmi.cvut.cz

³ RNDr. Mgr. Petr Adolf Skřehot, ERGOWORK s.r.o., Raichlova 2659/2, 155 00 Praha 5 - Stodůlky; tel.: +420 777 828 865, email: ergowork@ergowork.cz

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

⁵ Mgr. Tomáš Fröhlich, DiS., T-SOFT a.s., Novodvorská 1010/14, 142 01 Praha 4; tel.: +420 261 710 561/2, email: frohlich@tsoft.cz

⁶ Ing. Jakub Marek, ERGOWORK s.r.o., Raichlova 2659/2, 155 00 Praha 5 - Stodůlky; tel.: +420 777 828 865, email: ergowork@ergowork.cz

behaviour of some heavy gases during their emergency release and to design a reliable dispersion model. Subsequently, to verify this model in real conditions by the release of CO₂ and measuring the response using detectors in space and time. The paper summarizes the course of sharp field tests and the subsequent way of evaluating the experimental data.

Key words:

Heavy Gas, Field Tests, Modeling, Software.

1 ÚVOD

Problematika úniku nebezpečných chemických látek a směsí představuje aktuální oblast, které je nezbytné věnovat dostatečnou pozornost v rámci prevence závažných havárií a chemické bezpečnosti. Únik těchto látek rovněž představuje reálné riziko, především ve vztahu k obyvatelstvu, které je hodnoceno jako nepřijatelné. Následky chemických havárií a jejich nebezpečný potenciál lze sledovat na řadě závažných úniků ve světě, které se odehrály převážně v druhé polovině dvacátého století. Na základě těchto událostí začal vznikat a postupně se rozšiřovat systém prevence závažných havárií. Součástí tohoto systému je i příprava scénářů a analýza dopadů možných havárií s únikem nebezpečných chemických látek a směsí v rámci příslušné bezpečnostní dokumentace. K tomuto účelu jsou v dnešní době využívány modelační softwarové nástroje, které umožňují poměrně snadno a rychle stanovit potenciální dopady chemických havárií.

2 SOFTWAREVÝ MODUL DEGAS

K analýze potencionálních úniků nebezpečných chemických látek a směsí, lze využít v rámci havarijního plánování modelovací softwarové nástroje. Modelace úniku nebezpečných chemických látek a směsí představuje proces predikce jejich šíření v prostředí na základě matematických modelů. Tento proces má široké využití, především v rámci havarijní připravenosti, kde slouží k doplnění analýz rizik bezpečnostní dokumentace. Modelace jsou jeden z nástrojů, které se využívají při stanovení scénářů a určení dopadů možných chemických havárií. Rovněž mohou sloužit k optimalizaci stanovení zóny havarijního plánování. V určité míře jsou ovšem využitelné i při samotném úniku nebezpečných látek v rámci poskytování informační podpory veliteli zásahu o možném rozsahu havárie k dosažení kvalitnějších a fundovanějších rozhodnutí na základě jejich výsledků. K tomuto účelu lze v dnešní době použít řadu modelačních softwarových nástrojů. Vývoj softwarového nástroje si však kromě detailního studia uvedené problematiky nutně žádá také provedení série terénních testů, jejichž výsledky umožní validovat použitý rozptylový model, aby co nejvíce odpovídal reálným podmínkám [1]. Nicméně i přes snahu o zkvalitnění výsledků modelací jsou tyto výsledky dle možností dostupných modelačních softwarových nástrojů spíše orientačního charakteru.

Vývojem modelovacího softwarového nástroje, který by byl vhodný pro screeningová modelování poskytující konzervativní výsledky, se v současné době zabývá projekt s názvem „Validace a verifikace modelu šíření a disperze těžkého plynu za specifických situací (DEGAS)“. Cílem projektu, který je řešený od roku 2015 do roku 2018, je vytvoření softwarového modulu DEGAS určeného pro modelování šíření těžkého plynu za různých povětrnostních podmínek. Řešení projektu předpokládá ověření modelu pro rozptyl těžkého plynu prostřednictvím terénních zkoušek a srovnávacích (verifikačních) testů [2].

Výsledkem projektu DEGAS bude modul určený pro predikci dosahu zraňujících koncentrací plyných látek a disperzí těžších než vzduch, které představují zejména v urbanizovaných a hustě osídlených oblastech významnou hrozbu. Té lze účinně předcházet pouze dokonalou znalostí jejich chování za různých povětrnostních podmínek, které představují jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňující jejich šíření v prostředí[3].

2.1 TERÉNNÍ OSTRÉ TESTY

V rámci řešeného projektu DEGAS byl před realizací „ostrých“ terénních testů realizován v říjnu roku 2016 zkušební validační experiment. Pro experiment bylo použito šedesáti tlakových lahví s CO₂ uložených v pěti přepravních svazcích. Výsledky těchto testů byly shrnuty v článku z roku 2017, který byl publikován v rámci konference „Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí 2017“. Získané poznatky z experimentu byly následně využity pro úpravu experimentální metodiky, způsobu detekce stopovače, snímkování i zpracování měřených dat. Při následných „ostrých“ testech, se řešitelský tým vyvaroval některým předchozím nedostatkům.

Metodika experimentu

Ostré testy byly provedeny ve dnech 10. až 12. dubna 2017. Celkem bylo použito v rámci experiment 14 detektorů CO₂, z nichž 8 bylo na polygonu (prostor bývalého vojenského letiště v Bechyni) rozmístěno v ose předpokládané trajektorie šíření těžkého plynu. Ve vzdálenostech 75 metrů a 100 metrů od zdroje úniku pak bylo 6 detektorů umístěno mimo tuto osu, a to v řadách kolmých. Jednotlivé detektory byly od sebe vzdáleny 10 metrů s výjimkou řad kolmých, které byly vzájemně vzdáleny 25 metrů. Jako zdroj úniku byl použit cylindrický tlakový zásobník s obsahem 6 000 kg CO₂. Únik plynu byl zahájen třetí den v 9:34:20 hod. SELČ. Po 16 minutách došlo k vyčerpání kapalně fáze, následkem čehož se uvnitř zásobníku snížil tlak. To se projevilo snížením rychlosti úniku. To byl signál pro uzavření výpustního kohoutu, který provedli přítomní hasiči 15. ženijního pluku AČR. Snímkování šíření těžkého plynu bylo prováděno pomocí Full HD kamery, dvou dalších videokamer a dronu s kamerou. Po ukončení úniku následovala bezpečnostní prodleva v délce asi 5 minut, neboť bylo nutné počkat, až koncentrace CO₂ na polygonu klesne pod 1 000 ppm. Tato koncentrace představuje bezpečnou hraniční koncentraci CO₂, kdy se při jejím překročení mohou začít rozvíjet negativní dopady na zdraví osob. Až poté mohlo být provedeno vypínání detektorů (cca v 9:55 hod.).

Fotodokumentace z ostrého testu:



Obrázek 1 Testovací polygon a rozmístění detektorů



Obrázek 2 Zkoušky instalovaných detektorů



Obrázek 3 Výtoková trubka (detail)



Obrázek 4 Zahájení úniku plynu



Obrázek 5 Celkový pohled na rozptylující se oblak



Obrázek 6 Rozptyl oblaku těžkého plynu v prostoru



Obrázek 7 Pohled ve směru trajektorie postupu oblaku



Obrázek 8 Celkový pohled na rozptylující se oblak

Podmínky během experimentu a použité přístroje

Na letišti se během experimentu vyskytovaly následující meteorologické podmínky: pokrytí oblohy oblaky 10/10 oblačností (Altostratus); beze srážek; teplota vzduchu na počátku experimentu 12,3 °C; na konci experimentu 13,2 °C; relativní vlhkost vzduchu během experimentu kolísala v rozmezí 43,0 až 60,7 %; bezvětří.

Pro měření koncentrace CO₂ bylo nutné použít přenosné přístroje schopné měřit okamžité koncentrace s krátkou integrační dobou, které fungují v kontinuálním režimu po dobu alespoň 60 minut. S ohledem na pozitivní zkušenosti z předchozích validačních testů, byly pro ostré testy použity infračervené senzory fungující na principu NDIR. Konkrétně se jednalo o přístroje značky Lutron – typ CO2-9904SD a typ MCH 383SD. Oba typy umožňují souběžně měřit koncentraci CO₂ a teplotu vzduchu, typ CO2-9904SD navíc umožňuje měření rosného bodu a relativní vlhkosti vzduchu. Detektory byly nastaveny na měření ve 2-sekundových intervalech, přičemž naměřená data byla zaznamenávána na SD karty ve formátu kompatibilním .xlsx.

Rozsah měření činí u typu CO2-9904SD 0 až 10 000 ppm, u typu MCH 383SD 0 až 4 000 ppm. Rozlišení obou přístrojů činí 1 ppm a přesnost měření je pro jednotlivé koncentrační rozsahy následující:

- $\leq 1\,000$ ppm CO₂ ± 40 ppm;
- 1 000 až 3 000 ppm CO₂ $\pm 5\%$;
- $>3\,000$ ppm CO₂ ± 250 ppm [4].

Ačkoli použité přístroje pro měření koncentrace CO₂ Lutron jsou výrobcem kalibrovány pro mnohem nižší koncentrace, než jaké se v oblaku reálně vyskytovaly, princip nedisperzivní infračervené spektrometrie (NDIR) umožňuje měřit i koncentrace výrazně vyšší (byť s významnější chybou měření). Metoda NDIR je založena na fyzikálním principu absorpce určité vlnové délky záření, které daným plynem prochází. Limitujícím faktorem měřicích vlastností těchto senzorů je, že vyšší koncentrace CO₂ vedou k jeho tzv. „oslepnutí“. Velký počet molekul totiž pohltí prakticky veškeré IR sledovaných vlnových délek, což se projeví na úbytku kvality měřicího signálu v oblasti vyšších měřicích rozsahů. Přístroj je tedy schopen „vidět“ jen určitou poměrnou část z celkového počtu molekul plynu, které senzorem projdou. Fitováním a kalibrací ovšem lze nastavit přístroj prakticky na jakýkoli koncentrační rozsah. Jak uvádí výrobce i odborná literatura, z níž bylo v rámci příprav terénních experimentů vycházeno, vyšší přesnosti měření (pod $\pm 5\%$) paradoxně dosahují právě senzory určené pro nižší měřicí rozsahy v řádech tisíců ppm.

To byl také důvod, proč byly použity právě přístroje značky Lutron. Navíc jsou velmi spolehlivé, jednoduché na obsluhu, cenově dostupné a především mobilní. Jejich funkčnost i za vysokých koncentrací CO₂ byla experimentálně ověřena již v rámci validačních testů (rok 2016). Základní chyba měření dosahovala cca $\pm 10\%$, což je sice hodnota relativně vysoká, nicméně přesnost samotných numerických modelů je ještě nižší (některé odborné zdroje uvádějí chybu až $\pm 25\%$), takže ji lze pro daný typ experimentů akceptovat jako rozumný kompromis (tj. poměr cena/výkon). Navíc je potřeba vzít v úvahu také fakt, že za reálných podmínek probíhají uvnitř oblaku dynamické jevy (turbulence), které se projevují výrazným kolísáním koncentrací plynu (tzv. fluktuace), které lze jen stěží objektivizovat, resp. měřit.

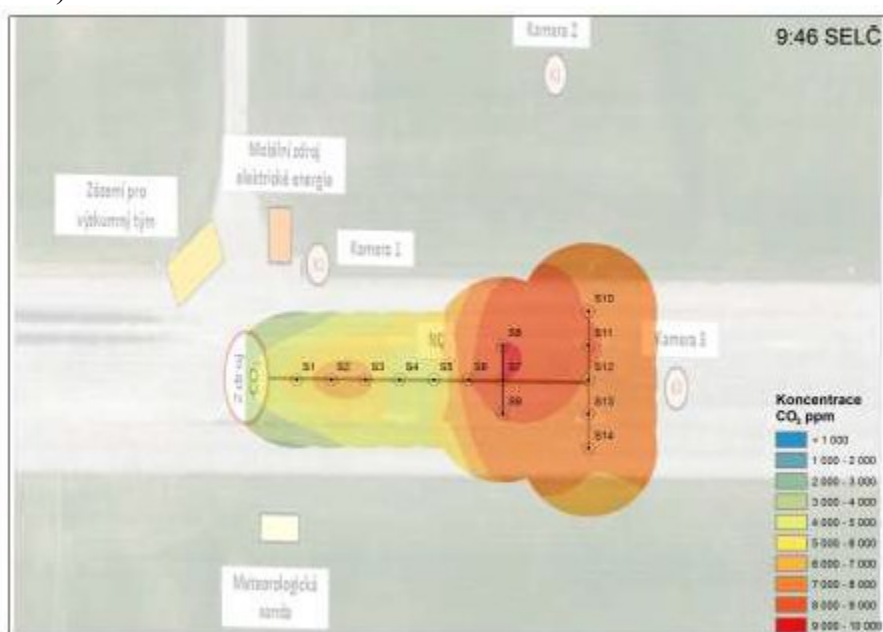
3 DISKUSE

Tento článek se primárně nezaměřuje na obšírnou publikaci výsledků měření a na jejich interpretaci (detailní vyhodnocení v současnosti stále probíhá), nýbrž na popis průběhu provedeného experimentu, prezentaci fotodokumentace a základní postup vyhodnocení.

Pro vyhodnocení koncentrací CO₂ naměřených jednotlivými samplery (umístěných v ose pohybu oblaku) byly vybrány maximální hodnoty (Max Real Data, nebo též MRD), které byly následně korigovány pomocí korekčního koeficientu. Použitý korekční koeficient byl stanoven interpolací mezi dvěma krajními (konzervativními) hodnotami, které byly získány podílem hodnot koncentrace CO₂

vypočtené programem ALOHA 5.4.7 a hodnotami Max Real Data pro jednotlivé vzdálenosti od zdroje. Za použití výsledných korekčních koeficientů byly naměřené hodnoty Max Real Data následně přepočítány. Takto získané korigované hodnoty tak představují nejvyšší koncentrace, které se během experimentu v oblaku a v dané vzdálenosti s největší pravděpodobností reálně vyskytovaly.

Pro přehlednější vyhodnocení provedených terénních experimentů byla použita metoda geostatistického krigingu. Nejdříve byla provedena normalizace měření mezi detektory S1-S5 a S6-S14 na stejné časy (každých 5 sekund) pomocí makra v MS Excel. Následně byla tato data koncentrace CO_2 interpolována v jednotlivých časech měření pomocí krigingu, čímž vznikla sada 354 rastrů ukazující koncentraci CO_2 v daném konkrétním čase. Ze získaných rastrů byla poté vytvořena minutová animace (viz detail níže).



Obrázek 9 Vyhodnocení průběhu koncentrace s nejvyšší koncentrací CO_2

4 ZÁVĚR

Účelem tohoto článku bylo popsat průběh terénního experimentu, který byl realizován v rámci řešení projektu DEGAS. Jelikož jsou obdobné polní testy (field tests) i jinde ve světě realizovány jen ojediněle [5], jednalo se o událost vsutku výjimečnou. Tento experiment, který se intenzivně připravoval několik měsíců, měl hlubší význam. Jeho smyslem bylo především získat experimentální data potřebná pro následnou verifikaci vyvinutého softwarového nástroje, resp. úpravu jeho matematických algoritmů pro výpočet šíření a disperze těžkého plynu za specifických podmínek. Během další fáze řešení projektu (tj. v roce 2018) bude prováděno „ladění“ programu tak, aby poskytoval dostatečně přesné výstupy. Po jejím ukončení bude finální software DEGAS, coby nový modul simulačního programu TerEx, uveden do komerčního prodeje.

PODĚKOVÁNÍ

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)“.

LITERATÚRA

- [1] ARIA [online]. Lyon: Bureau for Analysis of Industrial Risk and Pollution (BARPI). Dostupný na: <<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>>.
- [2] SKŘEHOT, P.A. et al. Projekt DEGAS - nejnovější poznatky a zajímavé synergie výzkumu rozptylu těžkých plynů. In *Aktuálne otázky BOZP 2016*, sborník příspěvků. Technická univerzita v Košiciach, Štrbské Pleso, 14.-16.10.2016, ISBN 978-80-553-3006-8.
- [3] HON, Z., MELICHAROVÁ, M., NAVRÁTIL, L.: Modelování nebezpečných dopadů chemických havárií. In.: 21. medzinárodná vedecká konferencia Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí, sborník příspěvků. Fakulta bezpečnostného inžinierstva UNIZA, Žilina, 25.-26. 5. 2016, s. 195-200, ISBN 978-80-554-1213-9.
- [4] SKŘEHOT P.A., MAREK J., MELICHAROVÁ M., HON Z., CIVIŠ M. Zajímavosti z terénních testů provedených v rámci výzkumného projektu DEGAS. In. XXX. medzinárodná vedecká konferencia Aktuálne otázky bezpečnosti práce, sborník příspěvků, Technická univerzita v Košiciach, Štrbské Pleso, 6.-8.11.2017, ISBN 978-80-553-2857-7.
- [5] SKŘEHOT P.A., MAREK J., SKŘEHOTOVÁ M., PÍŠALA J. Náhled do problematiky těžkých plynů a modelování jejich rozptylu. In *Aktuálne otázky bezpečnosti práce 2015: Sborník přednášek*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2015. ISBN 978-80-553-2302-2.