


# Studium projevů nebezpečných látek při chemických haváriích

 30.12.2020

## STUDY OF HAZARDOUS EFFECTS of SUBSTANCES during ACCIDENTS

**Jan Skřínský, Tadeáš Ochodek, Jakub Čespiva, Ján Vereš, Stanislav Bajer, Aleš Richter**

*Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 17. listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava-Poruba [jan.skrinsky@vsb.cz](mailto:jan.skrinsky@vsb.cz)*

nebezpečné látky

programy

analýza rizik

ALOHA

Google Earth Pro

### Abstrakt

Při studiu projevů nebezpečných látek při chemických haváriích, je nezbytné převést fyzikálně-chemické projevy požárů, výbuchů a toxických rozptylů na informaci, jaké následky mají na životy a zdraví lidí a zvířat, životní prostředí a majetek. Výsledek je pak charakterizován jako výstup hodnocení následků s výskytem řady neurčitostí. Proces modelování následků v sobě nutně zahrnuje nejistoty a neurčitost. Jakýkoli přístup k modelování, ať už jevů nebo účinku, nedokáže tyto nejistoty odstranit. Analýza nejistot vyšetřuje nejistoty ve výstupech modelu vzhledem k definovaným nejistotám ve vstupech do modelu. Vědomí těchto neurčitostí spojených s výsledky hodnocení rizika je nutné brát v úvahu při rizikově orientovaných rozhodnutích. V článku je uvedena citlivostní analýza modelů úniku v závislosti na rychlosti větru, velikosti plochy otvoru a teplotě okolí.

**Klíčová slova:** citlivostní analýza, únik, ALOHA, Google Earth Pro, free-ware program

### Abstract

When studying the effects of hazardous substances during chemical accidents, it is necessary to convert the physical-chemical effects of fires, explosions, toxic dispersions on the information about what consequences have these effects on people, property and the environment. The result is then characterized as the result of the evaluation of consequences with the occurrence of a number of uncertainties. The process of modelling consequences necessarily involves uncertainties and uncertainty. Any approach to modelling, whether phenomena or effects, cannot remove these uncertainties. Uncertainty analysis examines the uncertainties in the model outputs with respect to the defined uncertainties in the model inputs. Awareness of these uncertainties associated with the results of risk assessment and take them into account in risk-oriented decisions. The article presents a sensitivity analysis of leakage models depending on wind speed, whole size and ambient temperature.

**Keywords:** sensitivity analysis, release, ALOHA, Google Earth Pro, free-ware program.

Přijat k publikování / Received for publication 2. 12. 2020

## 1. Úvod

### 1.1 Popis problematiky

Modelování následků havárií v České republice má mezi obory orientovanými na bezpečnost dlouholetou tradici. Tento výzkum je situován v analytické oblasti bezpečnosti průmyslu. Článek nabízí možnost seznámit se s prvním krokem přístupu ke stanovení citlivosti výpočtových modelů na nejistoty vstupních parametrů. Citlivostní analýzou se v rámci článku rozumí sledování dopadů změny hodnot proměnných vstupních informací na výslednou vzdálenost k dosažení zvolené limitní koncentrace a tedy zóny ohrožení bez zahrnutí studia nejistot. Pomocí této analýzy lze zjistit, které parametry výsledek ovlivní nejvíce a které parametry pro výpočet téměř nahrají roli. Pro citlivostní analýzu byly vybrány parametr rychlost větru, velikost otvoru a teplota okolí pro nejpravděpodobnější podmínky obou havarijních úniků. Citlivostní analýza odhaduje efekt každého vstupu do modelu, a to buď samostatně, nebo prostřednictvím kombinovaných účinků na výstup modelu za účelem identifikace parametrů, které nejvíce ovlivňují výstupní nejistoty. To pomáhá určit, kam by se měla zaměřovat snaha na zlepšení predikce modelů. K dispozici je pak celá řada metod. Výběr metody závisí na úrovni požadovaných informací a povaze a výpočetních nákladech modelu, který je předmětem analýzy. Lokální metody jsou nejčastěji použity a poskytují efektivní způsob, jak identifikovat důležité parametry tam, kde není možné dosáhnout velkého množství běhů modelu. K demonstraci toho, jak mohou být výpočty analyzovány, jsou užita data reálné technologie. Ačkoli jsou tyto výpočty obvykle prováděny hermeticky uzavřenými počítačovými kódy, jejich koncepční znalosti pomohou rychle se zorientovat a vyhnout se chybám v přijetí absurdních, nadměrně konzervativních nebo příliš optimistických výsledků.

### 1.2 Stav znalostí

Tento text nepředstavuje obvyklou literární rešerši zadané problematiky. Zahrnuje tři rozsáhlá encyklopedická díla, která shrnují veškeré znalosti (experimentální i teoretické) dané problematiky pro účely této práce využitelné především v kontextu jejich aplikace v bezpečnostním inženýrství. Zatím nejrozsáhlejší dílo pojednávající o této problematice představuje revidované vydání „Loss Prevention in Process Industry“, F. P. Leese, publikované S. Mannanem v roce 2012. Ve třech svazcích je zde shromážděn rozsáhlý materiál zahrnující všechny aspekty dané problematiky od teoretických základů až po množství zcela adresných dat. Vše je doloženo několika tisíci odkazy. V tomto směru by předložený text stěžejně přinesl něco nového. Druhým fundamentálním dílem v této oblasti je „Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications“, jehož autory jsou Daniel A. Crowl a Joseph F. Louvar. Primárním cílem je pochopení, správné pojetí a aplikace důležitých základů modelování úniků nebezpečných látek v procesech chemické bezpečnosti. Toto vydání obsahuje také vybrané materiály z CCPS-AIChE. Skladba témat rovněž naznačuje šíři problematiky, kterou by měl zvládnout každý bezpečnostní inženýr při sestavování scénářů úniků chemických látek vedoucích k chemickým haváriím. Odborná publikace obsahuje klíčové informace k oblastem týkajících se toxikologie; zdrojových modelů; modelů týkajících se úniků a disperze toxických látek; modelů týkajících se výbuchů a požárů; návrhů systémů k prevenci požárů a výbuchů; návrhu systémů k potlačení výbuchů; identifikace nebezpečí; hodnocení rizik; vyšetřování havárií; případové studie. Třetí odborná publikace „Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment“ jejímž autorem je AIChE, představuje základ k pochopení výpočtů týkajících se následků a dopadů úniků nebezpečných chemických látek. Velice dobře jsou zpracovány odhady výpočtů. Kniha ilustruje v plné šíři současný stav problematiky konsekvenční analýzy chemických havárií, a to od modelování úniků nebo výtoků látek přes modelování negativních jevů (požárů, výbuchů a toxických rozptylů) po modelování dopadů těchto událostí na zdraví a životy lidí, na poškození majetku a životního prostředí.

### 1.3 Problém

Proces modelování následků v sobě nutně zahrnuje nejistoty a neurčitost. Jakýkoli přístup k modelování, ať už jeví nebo účinku, nedokáže tyto nejistoty odstranit. Zásadním problémem jsou nejistoty epistemické, mezery ve schopnosti odhadnout parametry, které často nejsou známy pouze v čase před vznikem havárie, ale při samotné havárii mohou zásadním způsobem ovlivnit její průběh (např. uniklé množství). Určitým problémem jsou i nejistoty aleatorní, jejichž správný popis a zpracování může být omezeno v případě situací a modelů, pro které je k dispozici málo kalibračních dat. Při použití modelovacích přístupů je často možné definovat nejistoty ve vstupních datech. Pro analytika je potom důležitou informací, do jaké míry se tato nejistota může zobrazit v datech výstupních. Specificky pro účely této práce je zásadní informací, jak se nejistoty v modelech účinku, nebo v datech na kterých jsou modely účinku stanoveny, mohou projevit v celkovém hodnocení následků. Jako případová studie byl vybrán únik oxidu uhelnatého. Simulován je scénář jednorázový únik celkového množství otvorem o velikosti celkového průřezu potrubí pro teplotu 25 °C, třídu stability ovzduší D, rychlost větru 5 m/s. Jednorázový únik celkového množství otvorem o velikosti celkového průřezu potrubí. Přízemní atmosférická teplota byla 10 a 25 °C, vítr foukal ze severu rychlostí 5,0 a 1,7 m/s (měřeno meteorologickou stanicí na místě 10 m nad zemí). Obloha byla pokryta mraky z 5/10 a vlhkost okolního vzduchu byla stanovena na 50%. Nebyla pozorována atmosférická inverze. Dosah přízemních koncentrací látek je stanoven pro 3 úrovně koncentrací 7000 ppm (odpovídající LC50 při expozici 30 min.), 2000 ppm (odpovídající LC10 při expozici 30 min.) a 1000 ppm (odpovídající LC1 při expozici 30 min.). Kontinuální únik otvorem o velikosti 10% průměru potrubí, maximálně však 50 mm. Přízemní atmosférická teplota byla 10 a 25 °C, vítr foukal ze severu rychlostí 5,0 a 1,7 m/s (měřeno meteorologickou stanicí na místě 10 m nad zemí). Obloha byla pokryta mraky z 5/10 a vlhkost okolního vzduchu byla stanovena na 50%. Nebyla pozorována atmosférická inverze. Dosah přízemních koncentrací látek je stanoven pro 3 úrovně koncentrací 7000 ppm (odpovídající LC50 při expozici 30 min.), 2000 ppm (odpovídající LC10 při expozici 30 min.) a 1000 ppm (odpovídající LC1 při expozici 30 min.). Program ALOHA vypočítal, že dosahy jednotlivých koncentrací ve venkovním prostředí byly v místě havárie následující: 7000 ppm (Red LOC) bylo možné naměřit až ve

vzdálenosti 918 m a koncentraci 1964 ppm (Orange LOC) ve vzdálenosti 1900 m. Ve vzdálenosti 900 metrů od místa úniku, tj. v místě hranice zóny mortality, pak dosáhla koncentrace hodnoty 7000 ppm po dobu 3 minut a koncentrace hodnoty 1964 ppm po dobu 5 minut.

## 2. Použité metody

Záměrem zde není vyjmenovat všechny dostupné počítačové programy z této oblasti, nýbrž jen informovat o typických příkladech. Nejznámější a nejpoužívanější jsou: ALOHA, WHAZAN, PHAST, SAFETI, RISKAT, EFFECTS, DAMAGE, ROZEX, TEREX. Pro demonstraci citlivostní analýzy byl jako metoda zvolen program ALOHA. Program byl zvolen na základě toho, že slouží k celkové analýze následků tj. úniku, vypařování, rozptylu, požáru, výbuchu, zranitelnosti (ne pouze k modelování dílčího jevu). Je volně ke stažení z webových stránek U. S. EPA. Všechny ostatní uvedené softwarové aplikace jsou licencovanými produkty, takže jejich použití by si vyžádalo souhlas držitelů příslušných licencí nebo přímo výrobce. ALOHA je jednoduchý 2D simulační software, určený k přibližnému modelování tvaru a rozsahu úniku nebezpečné látky do atmosféry. Díky této vlastnosti se řadí mezi tzv. box modely. Program je možno používat natively v prostředí Windows a MacOS X, eventuálně i v GNU/Linux s pomocí emulátoru wine. Programem ALOHA lze vypočítat variantní popis rozvoje závažné havárie, popis rozvoje příčinných a následných, na sebe navazujících a vedle sebe i posoupně probíhajících událostí, a to buď spontánně probíhajících anebo probíhajících jako činnost lidí, které mají za účel zvládnout průběh závažné havárie.

## 3. Výsledky

Výsledky citlivostní analýzy na rychlost větru, velikost otvoru a teplotu okolí jsou zobrazeny v následujících tabulkách. V tabulkách je vždy zvýrazněna hodnota daného parametru z výsledku simulací.

### 3.1 Citlivost na rychlost větru

Jako první parametr analýzy byla zvolena rychlost větru z blíže nespecifikovaného směru. Nastavení vychází z reálného scénáře 1 úniku oxidu uhelnatého z potrubí délky 1000 m, tlaku v potrubí je  $2 \cdot 10^5$  Pa, průměru potrubí 178,5 cm a teploty 25 °C. Velikost otvoru je 5000 cm<sup>2</sup>. Stabilita je proměnná a mění se na základě změny rychlosti větru (B: 1, 2 m/s; C: 3, 4, 5 m/s; D: 6, 7, 8, 9, 10 m/s). V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtů.

<b>RYCHLOST VĚTRU [M/S]</b>	<b>RYCHLOST ÚNIKU [KG/S]</b>	<b>DOBA TRVÁNÍ ÚNIKU [S]</b>	<b>LOC 1 [M]</b>	<b>LOC 2 [M]</b>	<b>LOC 3 [M]</b>
1	44,0	240	<b>229</b>	352	440
2	44,0	240	183	320	414
3	44,0	240	211	385	511
4	44,0	240	182	342	475
5	44,0	240	163	306	433
6	44,0	240	216	<b>411</b>	<b>574</b>
7	44,0	240	200	381	541

8	44,0	240	187	356	509
9	44,0	240	176	334	479
10	44,0	240	167	316	454

**Tabulka 1 Citlivost na rychlost větru**

Z hodnot v tabulce je zřejmé, že neexistuje trend v rozdělení vzdáleností. Maximální vzdálenost je 229 m pro koncentraci LOC 1 = 7000 ppm pro rychlost větru 1 m/s, 411 m pro koncentraci LOC 2 = 2000 ppm pro rychlost větru 6 m/s a 574 m pro koncentraci LOC 3 = 1000 ppm zvolené podmínky.

### 3.2 Citlivost na velikost plochy otvoru

Jako druhý parametr analýzy byla zvolena velikost plochy otvoru. Nastavení vychází z reálného scénáře 1 úniku oxidu uhelnatého z potrubí délky 1000 m, tlaku v potrubí je  $2 \cdot 10^5$  Pa, průměru potrubí 178,5 cm a teploty 25 °C. Třída stability je D s rychlostí větru 5 m/s.

<b>PLOCHA OTVORU ÚNIKU [CM<sup>2</sup> ]</b>	<b>RYCHLOST ÚNIKU [KG/S]</b>	<b>DOBA TRVÁNÍ ÚNIKU [S]</b>	<b>LOC 1 [M]</b>	<b>LOC 2 [M]</b>	<b>LOC 3 [M]</b>
100	2,1	3600	51	96	137
500	10,4	2280	114	216	308
2500	34,0	480	208	393	544
5000	44,0	240	238	445	604
10000	47,8	120	248	462	623
20000	48,2	60	<b>249</b>	<b>464</b>	<b>625</b>
25025	48,2	60	249	464	625

**Tabulka 2 Citlivost na velikost otvoru**

Z hodnot v tabulce je zřejmé, že se vzdálenost dosahu zvětšuje s rostoucí plochou otvoru úniku do hodnoty  $10^4$  cm<sup>2</sup> a pak je konstantní. Naopak doba úniku s rostoucí plochou otvoru klesá do hodnoty  $2 \cdot 10^4$  s a pak je konstantní. Maximální vzdálenost je 249 m pro koncentraci LOC 1 = 7000 ppm pro rychlost úniku 48,2 kg/s, 464 m pro koncentraci LOC 2 = 2000 ppm, pro rychlost úniku 48,2 kg/s a 625 m pro koncentraci LOC 3 = 1000 ppm pro rychlost úniku 48,2 kg/s vše pro zvolené podmínky.

### 3.3 Citlivost na teplotu okolí

Jako třetí parametr analýzy byla zvolena teplota okolí. Nastavení vychází z reálného scénáře 1 úniku oxidu uhelnatého z potrubí délky 1000 m, tlaku v potrubí je  $2 \cdot 10^5$  Pa, průměru potrubí 178,5 cm. Velikost otvoru je 5000 cm<sup>2</sup>. Třída stability je D s rychlostí větru 5 m/s. Z hodnot v tabulce je zřejmé, že vzdálenost dosahu není závislá na teplotě okolí.

TEPLOTA OKOLÍ [°C]	RYCHLOST ÚNIKU [KG/S]	DOBA TRVÁNÍ ÚNIKU [S]	LOC 1 [M]	LOC 2 [M]	LOC 3 [M]
0	47,5	240	237	443	602
5	46,7	240	237	443	602
10	46,0	240	237	443	603
15	45,3	240	237	444	603
20	44,7	240	237	445	603
25	44,0	240	238	445	604
30	43,3	240	238	445	605
35	42,7	240	238	446	605

**Tabulka 3 Citlivost na teplotu okolí**

Dále, mezi významné faktory patří molekulová hmotnost, která bude odpovídat očekávanému chování studovaného plynu. Pro třídu stability je jeden z významných faktorů výška rychlosti měření větru. Výška měření rychlosti větru má vliv na přepočtení rychlosti větru apod. Pro budoucí studii budou uvedeny výsledky pro citlivostní analýzu s použitím vstupních hodnot variovaných podle „reálných nejistot“ pro případ identických simulací. Důležitým faktorem je i průměrovací čas, který může být chápán jako určité vyjádření doby expozice. Z provedené analýzy vyplývá, že nejistoty, které jsou vztažené k tvorbě limitu akutní toxicity (jako zjednodušené reprezentaci modelu účinku), se významně projevují ve výsledcích zjednodušených modelů pro výpočet nebezpečných vzdáleností. Pro účely této práce se jedná spíše o ilustrativní příklad, který využívá jen úzkých možností citlivostní analýzy a vytvořeného software. Nicméně i v této omezené formě je zobrazením významnosti toho, do jaké míry je možné vůbec věřit predikcím využívaných modelů, s ohledem na nejistoty, které jsou v jejich rámci zakomponovány.

## 4. Závěr

Hodnocení následků, tedy modelování možných dopadů chemických havárií na obyvatelstvo, v sobě inherentně zahrnuje množství zásadních problémů. V jádru se vlastně jedná o „předvídaní budoucnosti“. Z aktuálního stavu systému a ze zkušeností získaných na základě proběhlých havárií nebo experimentování s podobnými systémy se snažíme předvídat, jak bude potenciální havárie probíhat a jaké bude mít dopady na člověka. Využití zobrazení výsledků modelování má pozitivní dopad na činnosti, které se skládají z různých postupů jak pro celkové zónové (fyzické) plánování v teritoriu, tak i pro případ potřeby rozhodnutí týkající se umístění jiného zařízení nebo jiných podniků.

Z hlediska prevence závažných havárií je třeba u nových objektů nebo zařízení stanovit přiměřené vzdálenosti mezi

zařízeními spadajícími do působnosti zákona o prevenci závažných havárií a sídelními oblastmi, oblastmi občanského soužití a oblastmi zvláštní přírodní citlivosti či zájmu. Budoucí aplikace tohoto přístupu nepřináší pro analytickou ani podnikatelskou sféru nové náklady, které by nevyplývaly již ze současného stavu při uplatňování nejlepší praxe v této oblasti. Přínosem pro provozovatele je lepší znalost rizika, jmenovitě následků, a tudíž možnost přípravy efektivních opatření na jejich snížení. Zároveň jim ušetří čas a náklady na opakovaná jednání s oponenty a následná přepracovávání dokumentace. Prezentovaný přístup je návodem, jak přistoupit k modelování scénářů havárií s nebezpečnými chemickými látkami. Postup popsany v práci přispívá k zajišťování celkové bezpečnosti obyvatelstva v okolí podniků zacházejících s nebezpečnými chemickými látkami.

## 5. Poděkování

Tato práce byla vypracována v rámci specifického výzkumu SP 2020/111.

## 6. Použitá literatura

1 ALOHA® 5.4.7: *Areal Locations of Hazardous Atmospheres* [online]. U.S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017 [cit. 2017-02-14]. Dostupný z: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>.

2 MANNAN, Sam. Toxic Release: chapter 18. In: *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2012. S. 1679-1760. ISBN 9780123971890.

3 GOODWIN, Bernard; FULLER, John; RYAN, Elizabeth. Toxic release and dispersion models: chapter 5. In: *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 3rd ed. Prentice Hall, 2011. S. 185-244. ISBN 0131382268.

4 RASC members. Effect Models: chapter 2.3. In: *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2nd ed. Center for Chemical Process Safety, 1999. S. 244-276. ISBN 0131382268.

### Vzorová citace

SKŘÍNSKÝ, Jan ...[et al.]. Studium projevů nebezpečných látek při chemických haváriích. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2020, roč. 13, č. 4. Dostupný z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/studium-projevu-nebezpecnych-latek-pri-chemickyh-havariich>. ISSN 1803-3687.

---

Autor článku:

[Ing. Jan Skřínský, Ph.D.](#)

[doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek](#)

[Ing. Jakub Čespiva](#)

[Ing. Ján Vereš, Ph.D.](#)

[Bc. Stanislav Bajer](#)

[Ing. Aleš Richter](#)