

HODNOCENÍ RIZIKA PŘEPRAVY AMONIAKU A CHLORU V MĚSTSKÝCH OBLASTECH

LIBOR KREJČÍ^a, BARBORA SCHÜLLEROVÁ^b
a VLADIMÍR ADAMEC^b

^a Centrum dopravního výzkumu, v.v.i, Líšeňská 33a, 636 00 Brno, ^b Ústav soudního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno
libor.krejci@cdv.cz, barbora.schullerova@usi.vutbr.cz, vladimir.adamec@usi.vutbr.cz

Došlo 10.2.17, přepracováno 19.10.17, přijato 24.11.17.

Klíčová slova: amoniak, chlor, silniční přeprava, riziko, havárie

Obsah

1. Úvod
2. Přístupy k hodnocení rizik
3. Silniční přeprava amoniaku a chloru
4. Postup hodnocení rizika
 - 4.1. Matematické řešení
 - 4.2. Simulační řešení
5. Závěr

1. Úvod

Nebezpečné látky a předměty jsou takové, které mohou pro svou povahu, vlastnosti nebo stav ohrozit bezpečnost osob, zvířat a věcí, nebo může být ohroženo životní prostředí¹. Silniční přeprava musí být prováděna v souladu s Evropskou dohodou o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí (ADR)².

Nebezpečné chemické látky a jejich přeprava jsou významným mobilním zdrojem rizika, zejména díky složité predikci jejich výskytu. Transportní trasy jsou plánovány s ohledem na výchozí a cílové místo přepravy, časové požadavky objednatele na provedení přepravy, legislativní omezení související s výběrem trasy a optimalizaci provozu vozidel a práce řidičů. Podstatným determinantem je ekonomika transportu, která výrazně ovlivňuje rozhodování subjektů zapojených do procesu přepravy a může mít výrazný vliv na výši rizika při přepravě. V případě mobilních zdrojů chemických látek vzniká nebezpečný prostor podél přepravních tras. Během plánování transportů je proto důležité zvolit vhodné postupy, které rizika identifikují a kvantifikují s následnou implementací náležitých mitigačních opatření. Kvantifikaci rizika lze provést nume-

ricky, ale i simulačně pomocí softwarových nástrojů. Objektívni hodnocení rizika by vždy mělo být východiskem při rozhodování o vhodné variantě přepravní trasy.

2. Přístupy k hodnocení rizik

Dopravní nehody při přepravě chemických látek mohou negativně postihnout infrastrukturu, životní prostředí a samozřejmě osoby (uživatelé infrastruktury a obyvatelstvo podél přepravních tras)³. Riziko při přepravě závisí na frekvenci a následcích dopravních nehod. Rizika jsou odvislá od druhu přepravované látky⁴, průběhu nehody a uniklém množství látky⁵, druhu komunikace (dálnice, městská a meziměstská komunikace, atd.), typu úseku komunikace (přímý, zatáčka, tunel, most atd.)⁶, okolí nehody (hustota obyvatelstva) a aktuálních klimatických podmínek.

Sjednoceným přístupem hodnocení rizika se snižuje celkové riziko přepravy, při zachování nákladů na bezpečnostní opatření⁷. Výběr přepravní trasy je prováděn individuálně na základě různých kritérií optimality. Jeden z nejčastějších přístupů jsou tato čtyři kritéria: zdravotní riziko v souvislosti s únikem látky při nehodě, náklady způsobené potenciálním zdržením, přepravní náklady na dané trase, vzdálenost zranitelných oblastí od trasy⁸.

Postup hodnocení rizika přepravy nebezpečných věcí v městských oblastech byl představen v rozsáhlé analýze pro město Boston v USA⁹. Krátkodobá distribuce osob ve školách, hotelech, nemocnicích, či návštěvníci byla odvozena pomocí GIS analýz⁹. Podnětná analýza rizika přepravy nebezpečných věcí v městské oblasti byla taktéž řešena ve městě Rosario (Argentina)¹⁰. Byl použit model šíření těžkého plynu pro šíření chloru, přičemž kritickým předpokladem přesnosti modelování je stabilita klimatických podmínek, síla a směr větru¹⁰.

Problematika hodnocení dopadů v souvislosti s únikem plynů a porovnání rizikovosti toxického amoniaku s hořlavým butadienem byla řešena v práci¹¹. Komparativní analýza prokázala vyšší riziko ekvivalentního množství amoniaku. K hodnocení ohrožení lidského zdraví chemickými látkami rozptýlenými do ovzduší byly stanoveny zóny ohrožení Acute Exposure Guideline Levels (AEGLS). Úroveň koncentrace pro stanovení zóny ohrožení byla stanovena pro nejrizikovější AEGL-3 – červená zóna. Tato úroveň udává koncentraci látky v ovzduší (vyjádřena v ppm nebo mg m⁻³), kdy při expozici v délce 1 hodiny bude populace včetně citlivých jedinců ohrožena na životě, případně usmrcena¹². Určení zóny ohrožení je kritickým předpokladem objektivní evaluace rizika (tab. I).

Jeden ze základních faktorů ovlivňujících výši rizika přepravy nebezpečných látek je výběr transportního módu.

Tabulka I
Limity zón ohrožení amoniaku a chloru v ppm

Zóna		Amoniak	Chlor
Červená	AEGL3	1100,0	20,0
Oranžová	AEGL2	160,0	2,0
Žlutá	AEGL1	30,0	0,5

Při použití železniční dopravy je v porovnání se silniční sníženo riziko, bez ohledu na způsob jeho hodnocení a přepravní trasu¹³. Využití železniční dopravy má ovšem v případě finální distribuce zboží koncovým odběratelům značné limity v podobě nízké flexibility. Další možností snížení rizika při přepravě nebezpečných látek je použití bezpečnějšího způsobu přepravy (přeprava v kusech, cisternách), času, typu komunikace. Při rozsáhlém výzkumu 708 dopravních nehod vozidel přepravujících nebezpečné látky v cisternách s lidským pochybením souviselo 73,8 % nehod¹⁴. Proto by měla být zaměřena pozornost na školení řidičů. Další snížení rizika spočívá v technologických opatřeních (stabilizační prostředky), ve zkvalitnění kontroly technického stavu vozidel a v plánování přepravy v bezpečnějších časech¹⁴. Nástrojem pro zvýšení bezpečnosti jsou i systémy tzv. geofencingu, které umožňují detekci vozidel přepravujících nebezpečné látky v zakázané oblasti¹⁵.

3. Silniční přeprava amoniaku a chloru

Toxické látky včetně amoniaku a chloru jsou nejčastěji přepravovány ve zkapalněném stavu¹⁶. Při kontaktu se vzduchem mohou reagovat, změnit skupenství na plynné a šířit se v ovzduší. V takových případech jsou pro zastavené oblasti zvláště rizikové tzv. těžké plyny, které jsou těžší než vzduch a šíří se při zemi¹⁷. Při úniku toxických plynů a par může rovněž dojít ke vzniku toxického oblaku. Látka je šířena po směru větru do okolí, kde může následně způsobit otravu, podráždění nebo poleptání sliznic. V některých případech dochází i k akumulaci plynů a par do takové míry, kdy se nebezpečná látka stává výbušnou a hořlavou¹⁸. K únikům toxických plynů a škodlivin může během havárie docházet i vlivem hoření, způsobeného iniciačním zdrojem po jejich uvolnění do ovzduší. Významnými zplodinami hoření s toxickými účinky jsou např. kyanovodík (hoření polymerních látek obsahujících dusík apod.), fosgen a chlorovodík (hoření PVC)¹⁸.

Amoniak bývá používán jako chladicí médium především v potravinářských provozech (mrazírny, mlékárny, pivovary)¹⁹. Bývá přepravován jako zkapalněný plyn pod tlakem, případně rozpuštěn v kapalině. Z jednoho litru zkapalněného amoniaku se může za normálních podmínek vytvořit až tisíc litrů plynného amoniaku¹⁶. Přestože plynná fáze je lehčí než vzduch, v místě odpařování z kapalně fáze se vytváří amoniaková mlha, která se chová jako plyn

těžší než vzduch a může zatékat do níže položených prostor¹⁸.

V České republice je amoniak přepravován silniční dopravou v tlakových lahvích o čisté hmotnosti náplně 40 nebo 575 kilogramů, anebo ve snímatelných cisternách o maximální hmotnosti náplně amoniaku až 16 800 kilogramů.

Chlor se přepravuje jako zkapalněný plyn, který se při kontaktu se vzduchem rychle se vypařuje a tvoří plyn 2,5× těžší než vzduch¹⁶. V České republice se přepravuje v tlakových nádobách o čisté hmotnosti náplně 65 a 650 kilogramů.

4. Postup hodnocení rizika

4.1. Matematické řešení

Hodnocení rizika je determinováno pravděpodobností výskytu nežádoucí události a rozsahem škody – dopady v důsledku vzniku události. V obecné rovině je tento vztah určen vzorcem (1).

$$R = \sum_{j=1}^n P_j C_j \quad (1)$$

kde R je riziko, P_j pravděpodobnost události a C_j dopady události.

Při hodnocení rizika přepravy nebezpečných věcí je nutné zohlednit nejen riziko vzniku dopravní nehody, ale zejména riziko následného úniku přepravované nebezpečné látky v důsledku dopravní nehody. Jednotlivé úseky pozemních komunikací, na kterých probíhá přeprava nebezpečných věcí, mají odlišné úrovně rizika nehody v závislosti na stavebně-technických parametrech komunikace. Přepravní trasa je proto rozdělena na úseky r s homogenní mírou rizika dopravní nehody ($r = 1..n$). Riziko v souvislosti s únikem nebezpečné látky je určeno variantami scénářů j úniku látky. Každý scénář je charakterizován určitou mírou nepříznivého dopadu na okolí ($j = 1..n$). Vzorec (2) určuje pravděpodobnost všech scénářů dopravní nehody P_a se scénáři úniku nebezpečné látky P_j .

$$P_{a,j} = \sum_{a,j=1}^n P_a P_j \quad (2)$$

kde $P_{a,j}$ je pravděpodobnost nehody vedoucí k úniku přepravované látky, P_a pravděpodobnost nehody při přepravě nebezpečných látek a P_j pravděpodobnost nehodového scénáře j v důsledku nehody.

Kvantifikace počtu potenciálně usmrcených (zraněných) osob je determinovaná pravděpodobností úniku smrtelné (zdraví škodlivé) koncentrace nebezpečné látky $P_{D,a,j}$, rozlohou zasažené oblasti při nehodě a s únikem smrtelné koncentrace nebezpečné látky při nehodovém scénáři j , $S_{D,a,j}$ a hustotou zalidnění v okolí úseku r . Vzorec (3) vyjadřuje vztah pro výpočet potenciálně usmr-

cených při všech nehodových scénářích s únikem smrtelné koncentrace nebezpečné látky na sledované trase.

$$D = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^n (P_{D,a,j} S_{D,a,j} H_r) \quad (3)$$

kde D je počet usmrčených v důsledku nehody při přepravě nebezpečných látek na trase, $P_{D,a,j}$ pravděpodobnost úniku smrtelné koncentrace nebezpečné látky při nehodě a při nehodovém scénáři j , $S_{D,a,j}$ rozloha zasažené oblasti při nehodě a s únikem smrtelné koncentrace nebezpečné látky při nehodovém scénáři j [m^2] a H_r hustota zalidnění v okolí úseku r [osob/ m^2].

Jednotlivé atributy ovlivňující závažnost dopravní nehody s únikem nebezpečných látek mohou být příslušnými preventivními a mitigačními opatřeními upraveny pro snížení rizika při přepravě (tab. II) (4):

$$D_V = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\left(\sum_{k=1}^n k P_a \right) \left(\sum_{l=1}^n l P_j \right) \left(\sum_{m=1}^n m P_{D,a,j} \right) \left(\sum_{p=1}^n p S_{D,a,j} \right) \left(\sum_{q=1}^n q H_r \right) \right) \quad (4)$$

kde k, l, m, p, q jsou koeficienty prevence a mitigace.

Tabulka II
Porovnání atributů ovlivňujících riziko přepravy

Matematické vyjádření	Atributy	Příklad preventivních a mitigačních opatření	Snížení pravděpodobnosti vzniku nehody	Snížení rozsahu dopadů	Koeficient prevence a mitigace
P_a	Řidič	Školení defenzivní jízdy	Ano	Částečně ano	[0,70 – 0,95]
	Vozidlo	Kontrola technického stavu vozidla	Ano	Částečně ano	[0,95 – 0,99]
	Infrastruktura	Zkvalitnění povrchu vozovky	Ano	Ne	[0,95 – 0,99]
P_j	Geometrické parametry nádrže	Rozdělení cisterny vlnolamy	Ano	Ano	[0,90 – 0,95]
	Elektronické systémy stability vozidla	Funkční elektronické systémy ABS, ASR, ESP	Ano	Ne	[0,97 – 0,98]
$P_{D,a,j}$	Druh látky	Použití méně rizikové látky	Ne	Ano	[0,10 – 0,95]
	Množství látky	Omezení množství	Ne	Ano	[0,60 – 0,99]
	Fyzikálně-chemické vlastnosti látky	Úprava tlaku, teploty, skupenství látky	Ne	Ano	[0,90 – 0,99]
	Potenciální velikost ruptury	Zvýšení konstrukční pevnosti pláště cisterny	Ne	Ano	[0,01 – 0,99]
$S_{D,a,j}$	Atmosférické podmínky	Směr a síla větru	Ne	Ano	[0,60 – 0,99]
	Postup řidiče po nehodě	Odpojení elektroinstalace, použití povinné výbavy, ...	Ne	Ano	[0,70 – 0,99]
	Zásah IZS	Rychlost zásahu IZS	Ne	Ano	[0,50 – 0,99]
H_r	Hustota osídlení	Změna trasy přepravy	Ne	Ano	[0,01 – 0,99]
	Hustota ostatních účastníků silničního provozu		Ne	Ano	[0,01 – 0,99]

Tabulka III
Výsledky simulace úniku amoniaku a chloru

Unikající látka	Amoniak		Chlor	
Kapacita zdroje [kg]	575	16 800	65	600
Doba úniku [min]	1	16	1	1
Maximální rychlost úniku [kg min ⁻¹]	575	2240	65	600
Množství uniklé látky [kg]	575	7996	65	65
Model šíření plynu	Gaussovo rozložení	Gaussovo rozložení	Těžký plyn	Těžký plyn
Poloměr zasažené oblasti				
červená zóna [m]	239	1100	678	678
oranžová zóna [m]	669	3400	1700	1700
žlutá zóna [m]	1200	7600	2800	2800

Ovšem amoniak i chlor je skladován a přepravován kryogennicky, což zvyšuje jejich hustotu. Aerosoly plynů se při nashromáždění v dostatečném množství chovají před vypařením jako těžký plyn²¹. U malého množství amoniaku lze předpokládat, že se bude šířit jako plyn lehčí, nebo stejně těžký jako vzduch. Unikající amoniak v relativně malém množství (575 kg) byl proto modelován podle Gaussova modelu. Pro větší množství amoniaku (16 800 kg) bylo zvoleno modelování šíření látek jako těžký plyn. Tento model byl zvolen i pro únik chloru (65 kg a 600 kg), jelikož se jedná o plyn těžší než vzduch.

Případová studie modelování šíření amoniaku a chloru byla provedena v městské oblasti s následujícími vstupními údaji: teplota vzduchu 21,8 °C, rychlost větru 3,5 m s⁻¹ a relativní vlhkost 50 % (tab. III).

5. Závěr

Cílem případové studie bylo ověřit rozsah nebezpečné zóny v případě úniku amoniaku a chloru v zastavěné městské oblasti s vysokou frekvencí dopravy a pohybu obyvatel. Podnětem ke zpracování studie se zaměřením na městskou zástavbu s vysokou koncentrací obyvatel se staly i teroristické útoky motorovými vozidly s cílem poranit nebo usmrtit vysoký počet osob. V tomto případě se stává rizikovým faktorem možnost zneužití vozidel přepravujících nebezpečné látky městskými lokalitami.

V případě mobilních zdrojů amoniaku a chloru, které se za účelem zásobování pohybují i v městských oblastech, simulační řešení prokázalo rozdílnou míru dopadu v závislosti na druhu a velikosti zdroje nebezpečné látky. Matematické řešení je naopak použitelné i pro ohodnocení preventivních atributů, které zohledňují faktory ovlivňující riziko vzniku nehody a závažnost následků nehod. Kritickým předpokladem je správné ohodnocení jednotlivých faktorů. Nejvhodnějším postupem se jeví synergické využití obou přístupů – matematický pro ohodnocení preven-

tivních a mitigačních opatření a simulační pro stanovení rozsahu zasažené oblasti.

V návaznosti na získané výsledky modelování bylo rovněž cílem navrhnout preventivní a mitigační opatření v souvislosti s nehodami při přepravě nebezpečných látek. Zajištění dalších postupů, jiných než stanovuje legislativa pro zajištění ochrany obyvatelstva, je ve většině případů komplikované. Přesto je pro snížení celkové míry společenského rizika nezbytné příslušné mitigační opatření implementovat. Návrhu opatření však musí předcházet kvantifikace současné úrovně rizika na základě analýzy a hodnocení rizik.

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci programu Národní program udržitelnosti I, projektu Dopravní VaV centrum (LO1610) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

LITERATURA

1. Raemdonck K. V., Macharis C., Mairesse O.: *J. Saf. Res.* 45, 55 (2013).
2. Předpis. *Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí* ADR 2017. ECE/TRANS/242, Vol. I and II (UNECE 2017).
3. Conca A., Ridella C., Saponi E.: 6th Transport Research Arena, Warsaw, 18-21 April 2016, *Transp. Res. Procedia* (Rafalski L., Zofka A., ed.), 14, str. 2890, Elsevier B.V., 2016.
4. Adler M. W., Ommeren v. J., Rietveld P.: *Econ. Transp.* 2, 109 (2013).
5. Amezaga J. M., Ambituuni A., Werner D.: *Saf. Sci.* 79, 324 (2015).
6. Kinateder M., Gromer D., Gast P., Buld S., Müller M., Jost M., Nehfischer M., Mühlberger A., Pauli P.: *Fire Saf. J.* 78, 24 (2015).

7. Benekos I., Diamantidis D.: *Saf. Sci.* 91, 1 (2017).
8. Inanloo B., Tansel B.: *J. Loss Prev. Process Ind.* 40, 266 (2016).
9. Greenberg A., McSweeney T.: Report. Battelle Memorial Institute, Columbus 2011.
10. Scenna N. J., Santa Cruz A. S. M.: *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 90, 83 (2005).
11. Chakrabarti U. K., Parikh J. K.: *J. Loss Prev. Process Ind.* 24, 758 (2011).
12. Inanloo B., Tansel B.: *95th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, D. C., 10-14 January, 2016, TRB papers 2016 (bez editora), AT040, str. 1.
13. Bagheri M., Verma M., Verter V.: *Risk Anal.* 34, 168 (2014).
14. Shen X. Y., Yan Y., Li X. N., Xie C. J., Wang L. H.: *Traffic Inj. Prev.* 15, 762 (2014).
15. Reclus F., Tim J. CH., Flaus J-M., Nicolle S., Daguinos T., David E.: *95th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, D. C., 10-14 January, 2016, TRB papers 2015 (bez editora), 251, str. 1.
16. http://www.bcgaco.uk/pages/index.cfm?page_id=31, staženo 6.12.2016.
17. <https://emergency.cdc.gov/agent/chlorine/>, staženo 6.12.2016.
18. Griffiths R. F., Kaiser G. D.: *J. Hazard. Mater.* 6, 197 (1982).
19. Míka O. J., Matoušek J.: *Chem. Listy* 105, 514 (2011).
20. EPA ALOHA. Atmospheric dispersion model for evaluating of hazardous chemical vapors 5.4.7. United States Environmental Protection Agency, Washington 2016.
21. EPA CAMEO. Chemicals 2.7. United States Environmental Protection Agency, Washington 2016.

L. Krejčí^a, B. Schüllerová^b, and V. Adamec^b
(*CDV – Transport Research Centre, Brno, Institute of Forensic Engineering, University of Technology, Brno*):
Risk Assessment of the Transport of Ammonia and Chlorine in Urban Areas

Ammonia and chlorine belong among the most frequently transported hazardous toxic substances. In this paper, the process of the quantification of the risk associated with the transport of these substances in urban areas is presented. A mathematical and a simulation approach for a model leakage of these substances in road accidents are compared. The synergistic use of both approaches proved to be the most appropriate – the mathematical one to evaluate the preventive and mitigation measures, while the simulation to determine the extent of the affected area. Measures to be taken were suggested to reduce the risk associated with the transport of hazardous substances.