

PŘEHLEDOVÝ ČLÁNEK / REVIEW ARTICLE

DEKONTAMINACE VYSOCE RIZIKOVÝCH BIOLOGICKÝCH PATOGENŮ – PROBLEMATIKA APLIKAČNÍCH PROSTŘEDKŮ DECONTAMINATION OF HIGH-RISK BIOLOGICAL AGENTS – SPRAYING CHALLENGES

Aleš Rybka¹, Alan Gavel², Jakub Meloun³, Lucie Tichá¹, Jaroslav Pejchal⁴✉

¹ Odbor biologické ochrany, Vojenský zdravotní ústav Agentury vojenského zdravotnictví Armády České republiky, Těchonín, 561 64 Těchonín, Česká republika

² Institut ochrany obyvatelstva, Hasičský záchranný sbor České republiky, Na Lužci 204, 533 41 Lázně Bohdaneč, Česká republika

³ Zdravotní ústav se sídlem v Ústí nad Labem, Moskevská 1531/15, 400 01 Ústí nad Labem, Česká republika

⁴ Katedra toxikologie a vojenské farmacie, Fakulty vojenského zdravotnictví, Univerzita obrany, Třebešská 1575, 500 01 Hradec Králové, Česká republika

Přijato 22. září 2019.

Akceptováno 29. října 2019.

Zveřejněno 6. prosince 2019.

Souhrn

Účinnost dekontaminačního procesu osob, které používají osobní ochranné prostředky a jsou dekontaminovány před konečným výstupem z nebezpečné zóny, může ovlivnit mnoho nepříznivých faktorů. Jedním z nejdůležitějších faktorů je kvalita aplikovaného aerosolu, jež je určena zejména velikostí a množstvím nanášených kapek. Kvalita aerosolu má úzký vztah k efektivitě pokrytí cílové plochy nebo naopak k vychýlení kapek ze směru letu, tzv. driftu. Studie srovnávající např. velikost kapek, rychlost, trajektorii, výšku postřiku, viskozitu, povrchové napětí a rychlost větru jsou vzácné. Kvalitu postřiku a jeho aplikaci od 50. let 20. století intenzivně studuje zemědělský výzkum. Ačkoliv má jeho problematika svá specifika, může poskytnout důležitá vodítka pro zefektivnění dekontaminace vysoce rizikových biologických patogenů.

Klíčová slova: Dekontaminace; kvalita aerosolu; velikost kapek; drift; klimatické podmínky; zemědělství

Summary

Many unfavourable factors can affect decontamination efficacy when personnel wearing personal protective equipment are decontaminated prior to their final exit from the hot zone. One of the most important factors is the quality of aerosol, which is determined mainly by the size and amount of droplets. Aerosol quality is closely related to the target area coverage efficacy or to deflection of droplets from the direction of flight, so called drift. Studies comparing, e.g., droplet size, velocity, trajectory, spray height, viscosity, surface tension, and wind speed are scarce. The quality of spraying and its application have been intensively studied by agricultural research since the 1950s. Although this research has specific characteristics, it can provide important guidance for the decontamination of high-risk biological pathogens.

Key words: Decontamination; spray quality; droplet size; drift; climatic conditions; agriculture

Úvod

Dekontaminace zasahujících složek kontaminovaných vysoce rizikovými agens je jedním z klíčových kroků, který vede k minimalizaci šíření nákazy. Ve většině případů se provádí na hranici nebezpečné a vnější zóny (v anglické literatuře označované jako „hot/warm zone“). V České republice patří mezi nejběžnější metody nanášení dezinfekčního roztoku pomocí aplikačních, resp. mechanických prostředků (smetáčky, postřikovače, sprchy, atd.) a to ve formě pěny nebo vodného roztoku. Zlatým standardem Armády České republiky i složek integrovaného záchranného systému je použití kyseliny peroctové ve formě vodného roztoku. Vzhledem k časové limitaci pobytu zasahujícího personálu na dekontaminačním stanovišti je kladen důraz na rychlé, ale přitom spolehlivé metody aplikace.

Účinná dekontaminace zasahujících složek je ovlivněna celou řadou faktorů. Kromě správného výběru dezinfekčního přípravku, jeho koncentrace, doby expozice nebo zkušeností personálu, jsou informace o vlastnostech generovaného dezinfekčního aerosolu a omezujících podmínkách klíčové pro zajištění účinnosti celého procesu. Ta je navíc znesnadněna hydrofobní úpravou a vertikálními pozicemi při nošení celotělových ochranných oděvů používaných v nebezpečné zóně. V neposlední řadě ovlivní vhodný aplikační prostředek společně se způsobem nanášení množství odpadní kontaminované tekutiny.

Přehled problematiky

Kvalita dezinfekčního aerosolu je charakterizována zejména velikostí a množstvím nanášených kapek. Nejběžněji užívanou veličinou pro popsání velikosti kapek je objemový průměr (D_v) udávaný v μm . Jeho střední hodnota ($D_{v0,5}$) je označovaná též jako střední objemový průměr (VMD). Pokud VMD např. dosahuje hodnoty 100 μm , platí, že 50 % kapek z celkového objemu rozstříkované kapaliny je menších než průměrná hodnota 100 μm (1). Dle standardu Americké společnosti zemědělských a biologických inženýrů (ASAE S572.2) vyvinutého pro potřeby standardizace trysek se generované kapky dělí dle velikosti (VMD) na extrémně/velmi jemné, jemné, střední, hrubé, velmi/extrémně/ultra hrubé (viz tabulka 1) (2).

Tabulka 1. Dělení kapek dle velikosti (orientačně hodnoty dle starší verze ASABE S572.1) (3)

VMD (μm)	kvalita kapky	anglický ekvivalent	zkratka
<60	extrémně jemné	extremely fine	XF
60–105	velmi jemné	very fine	VF
106–235	jemné	fine	F
236–340	střední	medium	M
341–403	hrubé	coarse	C
404–502	velmi hrubé	very coarse	VC
503–665	extrémně hrubé	extremely coarse	XC
> 665	ultra hrubé	ultra coarse	UC

Samotný VMD je nicméně pro popis aerosolu nedostačující. Podobným způsobem jako VMD jsou proto definovány $DV_{0,1}$ a $DV_{0,9}$. Tyto dva parametry vyjadřují hodnoty objemového průměru kapky na úrovni 10 %, resp. 90 % celkového objemu rozstříkované kapaliny. VMD, $DV_{0,1}$ a $DV_{0,9}$ dohromady umožňují popsat distribuci velikosti kapek v aerosolu (1).

Pro zhodnocení vlastního množství kapek lze použít např. střední numerický průměr (NMD). NMD je definován počtem kapek menších než daný průměr (1). Vztah mezi počtem kapek a jejich objemem vychází z jednoduchých výpočtů objemu vzorce ($V = 4/3\pi r^3$). Dvojnásobné snížení průměru kapky tak povede k osminásobnému zvýšení počtu částic.

Velikost a množství kapek aerosolu jsou závislé na řadě parametrů. Těmi nejdůležitějšími jsou konstrukce trysek, vlastnosti nanášené tekutiny a tlak, kterým je kapalina přes trysku tlačena. Trysek existuje široká škála. Jmenovat lze např. šterbinové trysky s plochým paprskem, které mohou generovat malé kapky (standardní typ)

nebo velké částice (s přisáváním vzduchu pomocí Venturiho efektu, tzv. nízkoúletové). Pro ruční postřikovače se často používají trysky s kuželovitým výstřikem dutým nebo plným (rovnoměrná nebo nerovnoměrná distribuce kapek). Mezi další varianty řadíme deflekční (protinárazové) trysky operující při nízkém tlaku nebo např. dvoumédiové trysky pracující se stlačeným vzduchem a kapalinou.

Velikost kapek ovlivňují i vlastnosti kapalin. Zatímco snížení hustoty nemusí mít významný vliv, redukce dynamického povrchového napětí velikost kapek zmenšuje. Přidání emulze do kapaliny přispívá naopak k rychlejšímu rozpadu na velké kapky (4). Poměrně složitý je vztah mezi viskozitou kapalin, charakterem proudění a rozpadem proudu na kapky. Obvykle platí, že při turbulentním proudění nemají změny viskozity vliv na VMD. Při laminárním proudění se však VMD zvyšuje s rostoucí viskozitou aplikované kapaliny. Vliv tvrdosti vody, typu aditiva a jeho koncentrace tuto problematiku pro operační prostředí dále komplikují (5). Úprava fyzikálně-chemických vlastností aplikovaného přípravku pomocí aditiv často přináší špatně odhadnutelný výsledek (6). Modifikace komerčně vyráběných dezinfekčních přípravků a jejich aplikace bez nového ověření jejich vlastností proto není automaticky možná.

Velikost kapek aerosolu je možné regulovat i tlakem. Vyšší iniciační tlak udělí kapkám větší rychlost, čímž sníží jejich velikost. Z referenčního grafu standardu ASAE S572.2 lze pro referenční trysku s plochým paprskem a rozstříkovým úhlem 110° např. odhadnout, že při tlaku 450 kPa a průtoku 0,38 – 0,48 L/min jsou generovány velmi jemné až jemné kapky (VF/F). Při tlaku 300 kPa a průtoku 1,14 – 1,18 L/min pak vznikají jemné až střední kapky (F/M) (2).

Velikost a množství kapek má úzký vztah ke kvalitě pokrytí cílové plochy. Nejvyšší pokrytí cílové plochy je obvykle dosaženo malými částicemi, které jsou však náchylnější na působení zevních faktorů (1). Na druhou stranu se velké kapky mohou po dopadu rozstříknout na malé a zlepšit tak distribuci nanášeného roztoku. Pro oblast zemědělství jsou kapky menší než 60 µm vhodné k aplikaci insekticidů vůči létajícímu hmyzu ve skleníku, kapky 60–200 µm účinně likvidují škůdce na listech a kapky do velikosti 400 µm jsou užívány pro nanášení herbicidů a jeho průniku k zemi. Kapky větší než 400 µm nejsou vhodné, protože mají tendenci se odrážet (7). Nepřímá úměra mezi velikostí aplikovaných kapek a kvalitou pokrytí cílové plochy má ale svoje limity. Pokud jsou kapky příliš malé a např. teplota vzduchu je 10 – 30 °C a relativní vlhkost nepřesahuje 60 %, dochází u kapek o velikosti ≤ 50 µm ke kompletnímu odpaření před dosažením 0,5 m vzdálené plochy bez ohledu na iniciační rychlost (8).

Menší kapky jsou rovněž více náchylné k vychýlení ze směru letu, tzv. driftu (úletu kapek). Míra driftu závisí na široké škále faktorů. Stran vlastních kapek je úroveň vychýlení ovlivněna zejména jejich rychlostí a velikostí. Rozhodující pro rozsah nežádoucího driftu je také správná vzdálenost trysky od cílové plochy a některé její konstrukční parametry. Míra driftu nabývá na významu s rostoucí vzdáleností (9). Kratší vzdálenost proto snižuje riziko nežádoucího driftu, stejně jako redukce šíře rozstříknutého paprsku ze 110° na 80°, resp. 65° (10). Vliv pohybu trysky na případný úlet kapek v případě dekontaminace zasahujících je složité odhadnout. Jeho význam bude pravděpodobně nižší, než je tomu při tažení zemědělských strojů traktorem v případě zemědělské problematiky. Na druhou stranu je však žádoucí se naučit techniku pozvolného pohybu nanášecím prostředkem k zajištění rovnoměrného pokrytí cílové plochy a současné redukci driftu při generování kapek o malé velikosti.

Důležitou roli stran rozsahu driftu sehrávají také vnější podmínky, při kterých k aplikaci aerosolu dochází. Jsou jimi zejména rychlost větru, stabilita atmosféry, teplota vzduchu a relativní vlhkost. Vztah úletu a rychlosti větru silně koreluje a je prakticky lineární (11). Na druhou stranu ani bezvětří při silně stabilní atmosféře aplikaci jemného aerosolu neprospívá. Obdobně negativní efekt na disperzi jemného aerosolu vykazují i turbulence větru (1). Vliv větru je možné omezit instalací prvků, jakým je např. nástavec na trysku ve tvaru kužele. Jeho efekt je však jen částečný (12). Úroveň atmosférické stability rozhoduje o tom, zda malé částice stoupají vzhůru (odpolední horké léto) nebo zůstávají při zemi během jasné noci bez srážek vedoucí k teplotní inverzi. Chladný vzduch u země při teplotní inverzi pak představuje bariéru vertikálního pohybu částic, které zůstávají rozptýleny ve vzduchu po dlouhou dobu a mohou tak představovat riziko nežádoucího rozptýlu do velkých vzdáleností (13). Relativní vlhkost významně ovlivňuje míru odpařování (evaporaci). Evaporace kapek při nižší vlhkosti zvyšuje jejich drift. Čím více se kapka zmenšuje, tím se proces odpařování zrychluje. Kapky o velikosti pod 150 µm vysychají o 27 % rychleji než kapky nad touto velikostí. Vysvětlením může být proud vzduchu, který působí na celý povrch malé kapky, zatímco u velké kapky pouze na její část (1, 14). Vysoká vlhkost naopak rychlost odpařování kapek snižuje.

Pokud bychom např. hodnotili míru driftu u vertikálně směřujícího zařízení běžně používaného v zemědělství a relativní vlhkost dosahovala 100 %, lze při rychlosti větru přesahující 2,5 m/s zaznamenat u kapek o velikosti 10 µm úlet až do vzdálenosti 200 m (8).

Všechny výše jmenované faktory významně rozhodují o množství kapek dopadajících na cílovou plochu a jsou klíčové nejen pro zemědělskou oblast, ale i pro složky zasahující v případě kontaminace vysoce rizikovými biologickými patogeny. Do jaké míry však koreluje velikost kapek s účinností dekontaminačního procesu, není známo. Vyjít lze opět z experimentů prováděných v zemědělství. U kapek o velikosti 100 µm v porovnání s částicemi o velikosti 200, resp. 400 µm byla pozorována vyšší fytotoxicita, které menší kapky dosáhnou zřejmě díky násobně zvětšenému povrchu (15). Výhoda menších kapek z pohledu účinku mizí s rostoucím objemem aplikovaného přípravku, jak pozoroval Shaw a kol. při hodnocení účinnosti herbicidu rozstříkovaného v kapkách o velikosti 250, 350 a 450 µm. Při zvýšení aplikovaného objemu na 169 L/ha nebyl již vliv velikosti kapek pozorován (7).

Poslední důležitým aspektem, který má vztah k velikosti kapek, je celková spotřeba (objem) aplikovaných účinných látek. Množství použité tekutiny je limitující z pohledu zemědělství i dekontaminace vysoce rizikových agens. Zatímco první skupina preferuje malé objemy z důvodu nižších finančních nároků, méně spotřebované vody a menších dopadů na životní prostředí, v případě dekontaminace navíc přibývá faktor snazší likvidace menších množství odpadní tekutiny. Jedna z mála prací, které se zabývaly posouzením aplikačních prostředků z hlediska dosažení sporicidních účinků, srovnávala běžně dostupný elektrický zádový postřikovač a přístroj generující elektrostatické kapky (16). První zařízení bylo charakterizováno průtokem cca 1 L/min, tlakem 270 kPa a kónickou tryskou. Pokud vyjdeme ze standardu ASAE S572.2, lze odhadnout, že produkovalo kapky o střední velikosti (M). Tento přístroj potřeboval k pokrytí plochy 35 × 35 cm ze vzdálenosti 30 cm 10 sekund, což odpovídá spotřebě 167 mL sporicidního roztoku. Druhým zařízením byl elektrostatický postřikovač, jenž využívá proud vzduchu pro zajištění optimálního nasměrování především malých částic (snížení driftu). Tento přístroj produkuje při průtoku 62 mL/min kapky o velikosti 40 µm (extrémně jemné, XF). Pro pokrytí stejné plochy ze vzdálenosti 30 cm bylo potřeba 30 sekund. Spotřebu sporicidního roztoku lze tedy kalkulovat na 31 mL. Účinnost dekontaminace u obou typů přístrojů byla přítom srovnatelná. V odpadní vodě produkované klasickým postřikovačem bylo ale detekováno velké množství viabilních spor, což přispívá k potenciálnímu riziku šíření kontaminantu do otevřeného prostředí. Naopak nevýhodou elektrostatického postřikovače je jeho pořizovací cena (3 500 dolarů proti 250 dolarům u elektrického zádového postřikovače), náchylnost malých kapek stran driftu vlivem vnějšího prostředí a prodloužení doby nanášení. Ta by po přepočtu na plochu průměrného protichemického oděvu o ploše 2,5 – 3 m² vyžadovala přibližně 10 – 12 min (17). Ideálním by se tedy zdál být kompromis mezi oběma zařízeními.

Doporučení

Nežádoucím vlivu vnějšího prostředí a driftu obecně lze předejít rozvinutím malého uzavíratelného stanu, ve kterém bude dezinfekční roztok na zasahující nanášen. Navíc nebude potřeba upravovat vlastnosti kapalin ani přidávat technické doplňky redukcí úlet. V malém prostoru lze využít vlastní působení dezinfekčního aerosolu, při kterém dochází ke kondenzaci částic páry dezinfekční látky na povrchu mikrobiální buňky (resp. rozpuštěním uvnitř buňky). Aerosol je jako živý systém, ve kterém jsou procesy kondenzace a evaporace ve vzájemném vztahu. Vlivem základních fyzikálních podmínek prostředí (rozdíly v tenzi par) přechází neustále jedna forma v druhou. Nelze tedy kategoricky oddělit expozici aerosolovou a výpary (18).

Vzhledem k vztahu mezi generovaným tlakem, průtokem a velikostí kapek a s ohledem na požadovaný dezinfekční účinek je vhodné vybírat takové technické prostředky, které jsou schopné vytvářet kapky do velikosti M. Menší kapky zvětšují povrch aerosolu a již výše uvedeným mechanismem kondenzace přispívají k celkovému dezinfekčnímu účinku (18). Pomůckou k výběru může být dokument ASAE S572.2. Po pořízení vybraného aplikačního prostředku je žádoucí ověřit stabilitu průtoku, optimální vzdálenost trysky od cílové plochy a charakter nánosu např. aplikací barevného roztoku na savou plochu.

Závěr

Požadavky na nanášení účinných přípravků ve formě aerosolu, kterými se detailně zabývají odborníci v oblasti zemědělství, nelze absolutně převzít pro potřeby složek integrovaného záchranného systému nebo Armády ČR.

Z výše uvedených informací je však evidentní, že problematika aplikace přípravků je velice komplikovaná a použité metody nánosu dezinfekčního přípravku by měly adekvátně postihnout širokou škálu faktorů, které mohou negativně ovlivnit výslednou účinnost. Je nutné rovněž zohlednit časové limity dekontaminace zasahujících kontaminovaných vysoce rizikovými biologickými patogeny. Stanovení optimálních metod nánosu v závislosti na využitých technických prostředcích vyžaduje praktické experimenty, které pomohou vhodně modifikovat zvolené postupy.

Funding

This work was supported by the Ministry of the Interior of the Czech Republic by the project VI20172020095 “Decontamination of forces and means in the case of suspicion for presence of hazardous and highly hazardous agents - DEKOV RAT”.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest regarding the publication of this article.

Adherence to Ethical Standards

This article does not contain any studies involving animals performed by any of the authors. This article does not contain any studies involving human participants performed by any of the authors.

Literatura

1. Nuyttens D. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means [dissertation]. [Leuven]: Katholieke Universiteit Leuven, Belgium; 2007.
2. Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra [Internet]. ASABE; 2018 [cited 2019 Feb 2]. Report No.: 572.2.
3. ASABE S572.1 [Internet]. [cited 2019 Sep 19]. Available from: https://cdn2.hubspot.net/hub/95784/file-32015844-pdf/docs/asabe_s572.1_droplet_size_classification.pdf
4. Ellis MCB, Tuck CR, Miller PCH. The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles. *Crop Prot.* 1997 Feb 1;16(1):41–50.
5. Butler Ellis MC, Tuck CR. How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Prot.* 1999 Mar 1;18(2):101–9.
6. Al Heidary M, Douzals JP, Sinfort C, Vallet A. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *CROP Prot -Guildf.* 2014;63:120–30.
7. Shaw DR, Morris WH, Webster EP, Smith DB. Effects of Spray Volume and Droplet Size on Herbicide Deposition and Common Cocklebur (*Xanthium strumarium*) Control. *Weed Technol.* 2000;14(2):321–6.
8. Zhu H, Reichard DL, Fox RD, Brazee RD, Ozkan HE. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Trans ASAE USA.* 1994;37(5):1401–7.
9. Hobson PA, Miller PCH, Walklate PJ, Tuck CR, Western NM. Spray Drift from Hydraulic Spray Nozzles: the Use of a Computer Simulation Model to Examine Factors Influencing Drift. *J Agric Eng Res.* 1993 Apr 1;54(4):293–305.
10. Miller PCH, Ellis MCB, Lane AG, O’Sullivan CM, Tuck CR. Methods for minimising drift and off-target exposure from boom sprayer applications. *Asp Appl Biol.* 2011;(No.106):281–8.
11. Phillips JC, Miller PCH. Field and Wind Tunnel Measurements of the Airborne Spray Volume Downwind of Single Flat-Fan Nozzles. *J Agric Eng Res.* 1999 Feb 1;72(2):161–70.
12. Zhao H, Xie C, Liu F, He X, Zhang J, Song J. Effects of sprayers and nozzles on spray drift and terminal residues of imidacloprid on wheat. *Crop Prot.* 2014 Jun 1;60:78–82.
13. PISC. Spray drift management. Principles, Strategies and Supporting Information. Principles, Strategies and Supporting Information. PISC (SCARM). [Internet]. 2002 [cited 2019 Jul 14]. Report No.: 82.
14. Spillman JJ. Evaporation from freely falling droplets. *Aeronaut J.* 1984 May;88(875):181–5.
15. McKinlay KS, Brandt SA, Morse P, Ashford R. Droplet Size and Phytotoxicity of Herbicides. *Weed Sci.* 1972;20(5):450–2.

16. Archer J, Karnik M, Touati A, Aslett D, Abdel-Hady A. Evaluation of Electrostatic Sprayers for Use in a Personnel Decontamination Line Protocol for Biological Contamination Incident Response Operations, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, Report No.: EPA/600/R-18/283, 2018.
17. Rybka A, Gavel A, Prazak P, Meloun J, Pejchal J. Decontamination of CBRN units contaminated by highly contagious biological agents. *Epidemiol Mikrobiol Imunol Cas Spolecnosti Epidemiol Mikrobiol Ceske Lek Spolecnosti JE Purkyne*. 2019 Winter;68(1):40–5.
18. Ticháček, Bohumil. *Persteril*. Avicenum; 1972. 64 p.