

NOVÉ DETEKČNÍ PÁSKY KE ZJIŠTĚNÍ KAPALNÝCH AEROSOLŮ BOJOVÝCH CHEMICKÝCH LÁTEK A JINÝCH TOXICKÝCH SLOUČENIN

NEW DETECTION STRIPES FOR DETECTING LIQUID CWA AEROSOLS AND OTHER TOXIC CHEMICALS

Michal Dymák^{a,c*}, Lukáš Králík^a, Kamila Lunerová^a, Jakub Vaněk^a, Vladimír Pitschmann^{b,c}^a Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, Česká republika^b Oritest spol. s.r.o., Nábřeží 90/4, 150 00 Praha 5, Česká republika^c České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, Sítná 3105, 272 01 Kladno, Česká republika

*Korespondující autor. e-mail: dymak@sujchbo.cz, tel.: +420 603 719 585

Abstrakt

Hrozba zneužití chemických bojových látek nebo jejich náhodné rozšíření při manipulaci s nálezy neznámých předmětů je stále reálná. Pro rychlé a jednoduché zjištění přítomnosti těchto látek v kapalně podobě se s výhodou používají detekční papírky např. PP-3, které jsou založeny na principu barevných indikátorů reagujících skupinově na látky typu H, G a V. Toto řešení se používá již mnoho let, ale jeho nevýhodou je velký počet falešně pozitivních reakcí a poměrně malá specifita. Příspěvek sumarizuje dosavadní poznatky v této oblasti s ohledem na stále aktuální potřebu dalšího rozvoje jednoduchých detekčních prostředků pro zjišťování přítomnosti nejen chemických bojových látek a jejich prekurzorů, ale i řady toxických průmyslových chemikálií. Další vývoj v oblasti plošných detektorů spočívá ve zkoušení nových detekčních principů založených na doposud nevyužívaných reakcích analyt-chromogenní činidlo, v optimalizaci stávajících detekčních principů s využitím nových typů nosičů, zvyšováním specifčnosti a stability barevných odezev a rozšířením o možnost detekce i kapalných aerosolů.

Klíčová slova: detekční papírky, barevné reakce, bojové chemické látky, toxické průmyslové chemikálie, aerosol

Abstract

The threat of misuse of chemical warfare agents or their accidental release during handling of unknown objects is still real. Detection papers, such as PP-3, are used for rapid and simple detection of these agents and they are based on detection principle using indicators giving group colour reaction with H, G, or V agents. This simple solution has been used for many years, however it shows some disadvantages, namely many false positive responses and quite low specificity. The article summarises current knowledge in this field, as regards actual needs of developing simple detection means for rapid detection of chemical warfare agents and their precursors as well as many toxic industrial compounds. Ongoing research of planar detectors focuses on testing of new detection principles based on unused chromogenic reagents, optimisation of current detection principles using new types of carriers, increasing

the specificity and stability of colour products and searching of possibilities for liquid aerosol detection.

Key words: *detection papers, colour reactions, chemical warfare agents, toxic chemical compounds, aerosol*

1. ÚVOD

Již přes sto let uplynulo od zahájení moderní chemické války. Postupem doby došlo k zavedení a masové výrobě desítek různých chemických látek koncipovaných jako chemické zbraně. Zpočátku byly použity běžné průmyslové chemikálie, u nichž bylo využito známého toxického účinku na lidský organismus, a kde původní nebezpečná vlastnost dané látky byla proměněna v její hlavní užitnou devízu. Později, s rychlým vývojem válečného pokroku spolu s překotným vývojem chemického průmyslu došlo k objevu a zavedení dalších látek, které už byly přímo navrženy s cílem vojenského využití.

Zároveň s vývojem, zaváděním a užitím stále širšího spektra bojových chemických látek (BCHL) byla a nadále stále je řešena i ochrana před účinkem těchto látek a následně i postupy, jak minimalizovat vzniklou kontaminaci lidí, zvířat, techniky i terénu. V souboru těchto preventivních a nápravných opatření od počátku hrála a do budoucna i bude hrát detekce těchto látek, především v polních, resp. terénních podmínkách. Zpravidla se jedná o situace, v nichž dochází k prvotnímu kontaktu s nebezpečnou látkou, aniž by byla známa její povaha, koncentrace i zdroj. V takovýchto situacích je potenciální ohrožení osob nejvyšší a zároveň možnosti vybavení v terénu jsou relativně nejvíce omezené a odkázané na vybavení, které mají zasahující s sebou. I přes výrazný pokrok ve vývoji detekčních prostředků, ke kterému došlo za poslední století, jde stále o různě dokonalá technická řešení, která mohou podávat neúplné, zkreslené nebo i mylné informace o stavu chemické situace. Použijeme-li pak dva a více různých detekčních principů zároveň a dospějeme-li k souhlasným výsledkům, je mnohem nižší pravděpodobnost chybného výsledku, jelikož se dva nezávislé detektory vzájemně potvrzují.

Aktuální vývoj přináší stále nové instrumentální detektory, které ve stále menším balení nabízejí rychlejší a stále přesnější detekci neustále se zvyšujícího počtu látek a umožňují tak jednoduše a rychle detekovat jednotlivé látky anebo jejich skupiny, a to včetně jejich koncentrace nebo případných rozkladných produktů. Nevýhodou těchto detektorů je jejich vysoká pořizovací cena a obdobně vysoké provozní náklady. Dalším slabým místem může být kapacita zdroje energie a v neposlední řadě i možnost zahlcení detektoru analytem, které jej může zneschopnit i na poměrně dlouhou dobu. Druhou historicky starší skupinou, ale i nadále používanou a neméně rozvětvenou, jsou tzv. jednoduché detekční prostředky. Detekční mechanismus těchto prostředků je založen na různých chemických reakcích, během nichž se při přítomnosti sledované látky (nebo skupiny látek) vytvoří specificky barevná oblast, nebo v některých případech naopak dojde k odbarvení původně zbarvené oblasti. Takovéto reakce probíhají po kápnutí kapalného vzorku analytu zpravidla na plochý nosič obsahující indikátor, nebo prosáváním vzduchu s obsahem analytu skrze trubičku, v níž je umístěna indikační zóna. Pro drtivou většinu takovýchto detektorů je žádoucí využití takové reakce, která vede k jasné

rozeznatelné a výrazné barevné změně, aby tak výsledek detekce byl jednoznačný pouhým pozorováním.

V následujícím textu je zevrubně popsán stav výzkumu podobných jednoduchých detekčních prostředků, tak jak je uveřejňován v zahraniční odborné literatuře, jako východisko dalšího vývoje realizovaného v rámci tohoto projektu. V druhé části je uveden postup přípravy a výsledky po expozici plochého nosiče impregnovaného indikátorem Nile Blue A zástupcům všech hlavních skupin BCHL.

1.1 Využití chromogenních činidel pro detekci BCHL a průmyslových toxických látek

Řada doposud používaných detekčních prostředků, jako například detekční papírky PP3, byla vyvinuta před desítkami let pro využití ve vojenských konfliktech, v nichž byl reálný předpoklad využití BCHL nepřítelem. Pro uvedené použití byl kladen požadavek pro jednoduché použití a širokou dostupnost takového prostředku pro jednotlivce. Nízká specifická vznik barevných skvrn nebyla nedostatkem, jelikož hlavním smyslem bylo vyvarování se kontaktu s BCHL masivně distribuovanou na bojiště z munice nebo rozprašováním z leteckých prostředků. V takové situaci by byla barevná reakce dostatečná pro rychle provedená protipatření, jelikož se nepředpokládalo, že může dojít k vzniku barevné reakce vlivem dalších látek vyvolávajících barevnou reakci, ale nemající opodstatnění k použití jako BCHL. Při dnešní adaptaci využití takového prostředku spíše při průzkumu v rámci zdolávání mimořádné situace může být osoba pohybující se na lokalitě vystavena působení mnohem širšímu spektru chemických látek, z nichž mnohé mohou mít rovněž fatální následky a v těchto situacích může být nespecifičnost reakce PP3 potenciálním problémem. Je nasnadě, že vývoj dalších podobných, ale specifitějších prostředků i na ostatní skupiny látek mimo BCHL je aktuální a žádoucí.

V zahraniční literatuře je publikována řada článků zabývajících se vývojem nových jednoduchých detekčních prostředků založených na barevných změnách chromogenních činidel určených k detekci širokého spektra látek [1-9]. Výzkumná činnost není věnována pouze skupině BCHL, ale zaměřuje se i na řadu organofosfátů, jež jsou používány jako pesticidy a dále i na řadu potenciálně nebezpečných látek využívaných v průmyslu a chemické výrobě. Studie zaměřené na detekci BCHL jsou však často testovány pouze na simulacích a chybí zde nutná fáze, kdy by indikátory a detektory na nich založené byly otestovány na skutečných zástupcích látek ze skupiny BCHL. Získaná fakta jsou tak bez dalšího zkoušení, které je však již pro mnoho pracovišť nesnadno proveditelné, nevyužitelná pro uvedení poznatků do praxe. Z publikovaných studií bylo pouze ve čtyřech [3,5,8,9] využito zástupce skutečné BCHL.

Široká skupina chromogenních činidel obsahující rozličná barviva používaná v analytické chemii, histologii a v dalších přírodních vědách skýtá pro další rozvoj jednoduchých plochých detekčních prostředků slibný potenciál, jelikož jich celá řada nebyla doposud pro detekci nebezpečných toxických látek vyzkoušena, a představuje zajímavý způsob jejich další adaptace. Další oblastí je syntéza zcela nových činidel a indikátorů a jejich následné zkoušení. Z publikovaných studií většina [3-9] využívá chromogenních činidel ve formě roztoku a sledované změny jsou následně měřeny spektrofotometricky ve viditelném, případně i v UV spektru. Řada činidel vykazuje fluorescenci a těchto specifických emisí je rovněž využito v instrumentálním hodnocení sledovaných barevných změn. Publikované studie se zabývají všemi zájmovými skupinami BCHL

- ze skupiny organofosfátů byl zkoušen soman [3] a sarin [5] a dále i látka VX [5], zpuchýřující látky byly ve studiích zastoupeny yperitem [8] a zástupce dusivých BCHL představoval fosgen použitý ve studii [9]. Výsledky ze studií představují hodnotné informace a v rámci dalšího vývoje lze navrhovaná chromogenní činidla dále zkoušet v různých formách a nanosené na různé matrice. Z publikovaných studií bylo pouze ve dvou [1-2] použito plochého nosiče jako matrice pro nanosení indikátoru a u všech ostatních je nutno funkčnost detekčního mechanismu v případě nanosení látky na nosič ověřit.

Nová barviva, případně i jejich směsi je v rámci dalšího vývoje možno inkorporovat do moderních materiálů jako jsou například nanovláknové struktury nebo polymerní plošné porézní materiály s ideálními mechanickými vlastnostmi, jejichž složení ani struktura neovlivňuje průběh detekční reakce. Lze tak po odzkoušení vytvářet nové, pro použití jednoduché, trvanlivé, levné a tedy i široce dostupné detektory.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Indikace BCHL s využitím Nile Blue A

Nile Blue A je acidobazický indikátor a barvivo používané k obarvování buněk a tkání v biologii a histologii. Jde o tmavomodrou práškovou látku poměrně špatně rozpustnou ve vodě, ale velmi dobře rozpustnou v ethanolu. Výsledkem je dle koncentrace světla modrý až velmi tmavě modrý roztok, který v kyselé oblasti zůstává modrý a od hodnot pH 9 postupně přechází přes fialovou do jasně červenooranžové barvy.

Indikátor Nile Blue lze ve formě 0,1% roztoku v ethanolu použít k napuštění do vhodného materiálu jakým může být prostý filtrační papír, případně i další syntetické filtrační materiály. Vznikne rovnoměrně zbarvený světlemodrý povrch, který je za běžných podmínek (laboratorní teplota, uchování v suchu a temnu) dlouhodobě stabilní a doposud nejstarší připravené vzorky i po 6 měsících nevykazují rozdíly během jejich použití.

Takto připravené papírky vykazují po expozici kapalným chemikáliím v místě jejich absorpce do materiálu různé barevné změny. Samozřejmě jsou změny v případě expozice roztokům anorganických kyselin a zásad, ale některé organické látky vykazují taktéž specifické barevné změny, a lze tak podle charakteristické barevné změny použít takto připravené papírky jako jednoduchý detekční prostředek. Specifická pozornost byla v rámci tohoto testování věnována BCHL – bylo testováno 11 významných zástupců jak nervově paralytických látek, tak i zpuchýřujících látek.

Obsahem testování byla příprava identických papírků napuštěných 0,1% roztokem indikátoru Nile Blue a jejich následná expozice kapkám 11 různých BCHL a to za stejných podmínek a podle stejné metodiky. Každá látka byla exponována v triplikátu a exponované papírky byly ihned po expozici zdokumentovány a následně ovlhčeny jedním ze tří roztoků s dekontaminačním účinkem a opětovně zdokumentovány. Výsledkem je pak barevná změna specifická pro každý ze tří roztoků a BCHL, která byla na papír nakapána.

Testované látky zahrnovaly látky GA, GB, GD a GF jakožto představitele G skupiny NPL a dále HD, L, směs HD a L (HL) a HN1, HN2 a HN3 jako představitele H a L skupiny zpuchýřujících látek, jako poslední byla testována i látka VX

2.2 Postup přípravy detekční pásky

Prvotním krokem byla příprava 0,1% roztoku Nile Blue. Navážka 0,1 g indikátoru byla postupně rozpuštěna ve 100 ml 96% ethanolu. Rozpuštění probíhá pomalu a je výhodné použít ultrazvukové lázně. Připravený roztok je vhodné před použitím nechat odstát do druhého dne kvůli dokonalému rozpuštění větších zrn indikátoru. Je vhodné použít i třepačky. Pokud i přes to zůstávají v roztoku nerozpuštěné částice, je nutné roztok přefiltrovat. Připravený roztok je potřeba přechovávat dobře uzavřený, aby se rozpouštědlo neodpařovalo, a vyvarovat se jeho expozici slunečním paprskům. Připravený roztok je neomezeně stálý a lze jej využívat opakovaně do vypotřebování objemu.

Napuštění roztoku do nosiče (impregnace) proběhlo prostým ponořením papírku pomocí pinzety do Petriho misky nebo jiné vhodné nádoby, která má dostatečnou velikost, aby se do ní dal papír najednou ponořit. Po cca 5 vteřinách byl papír vyjmut, a po okapání položen na vhodný savý povrch k usušení. Sušení probíhalo volně a během schnutí byl papír několikrát přesunut, aby se nepřilepil a mohl k jeho povrchu vzduch i ze spodní strany. Usušené papírky mají být uchovávány v suchu a temnu a je třeba se vyvarovat expozici kyselinám i zásadám.

Papírky byly po expozici BCHL ovlhčeny třemi roztoky. Jde o vodné roztoky chloraminu B a hydroxidu sodného. Třetí roztok obsahuje obě látky zároveň. Postup přípravy roztoků byl následující:

- Připravíme si roztok sestávající se z destilované vody a 96% ethanolu v poměru 1:1. V tomto roztoku pak rozpustíme Chloramin B tak aby jeho koncentrace tvořila 10% - vznikne 10% roztok chloraminu B ve směsi ethanol-voda. Ve výsledcích je tento roztok označen „C“.
- Druhý roztok získáme přidáním hydroxidu sodného do směsi ethanol-voda tak aby jeho koncentrace tvořila 1%. Vzniklý roztok je značen „Na“.
- Třetí roztok získáme smísením alikvotů dvou předchozích roztoků v poměru 1:1. Tento roztok je označen „CNa“.

Roztoky byly uchovávány v uzavřených nádobách bez přístupu vzduchu v chladu a v temnu. Trvanlivost těchto roztoků je omezená – je vhodné používat čerstvě připravené roztoky.

2.3 Postup testování

Expozice připraveného papírku i jeho následné zpracování probíhala v digestoři a obsluha byla náležitě vybavena potřebnými OOPP. Vybrané usušené papírky byly předem označeny podle typu látky, jíž měly být exponovány i podle roztoku, jímž byly následně ovlhčeny. Pro každou látku bylo potřeba tři papírky, všechny ve větší Petriho misce, na jejímž dně byl umístěn bílý filtrační papír. Pomocí pipety bylo pak na každý papír nakapáno 5 kapek, každá o objemu 1 μ l. Každá z látek pak do materiálu různě rychle vsákla a i velikost kapky byla specifická pro každou z použitých BCHL. Proto je výhodné umístit kapky dále od sebe i od okraje papírku, aby nedošlo ke slítí kapek dohromady.

Neprodleně po aplikaci kapek byl zdokumentován vzhled exponované oblasti pomocí digitálního fotoaparátu, který měl vždy totožné nastavení – týká se především nastavení času,

clony a citlivosti, které musí být u všech snímání totožné, tak i nastavení vyvážení bílé, aby obraz nebyl zkreslen nádechem do teplých, případně studených tónů.

Ihned po zdokumentování stavu po kápnutí pětice kapek na celou sadu papírků byl třeba každý exponovaný papírek ovlhčen příslušným roztokem C, Na nebo CNa. K tomuto lze využít chromatografický postřikovač, případně i jiný umožňující aplikaci kapaliny ve formě rovnoměrné vodní tříště. Ovlhčení bylo provedeno vždy ze stejné vzdálenosti a při stejném počtu stisků páky nebo balonku, aby bylo množství i distribuce kapaliny na plochu papírku co nejpodobnější. Osvědčilo se, že na papír o průměru 70mm stačí čtyři stisky při vzdálenosti cca 15cm.

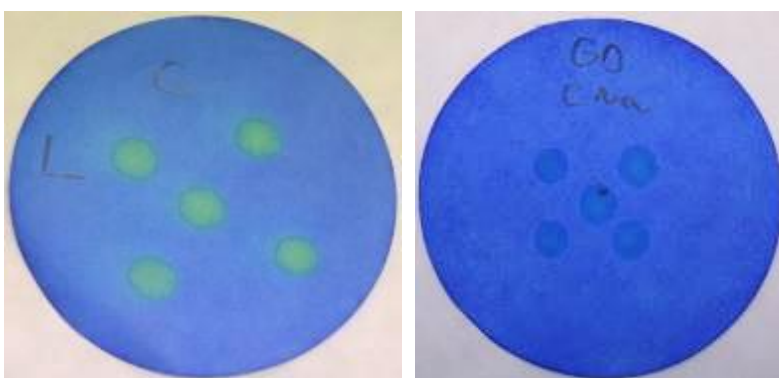
Ihned po aplikaci byl opět zdokumentován povrch papírku a následně byly papírky i s veškerým obsahem Petriho misek vhozeny do nádoby s 10% roztokem NaOH.

3. VÝSLEDKY

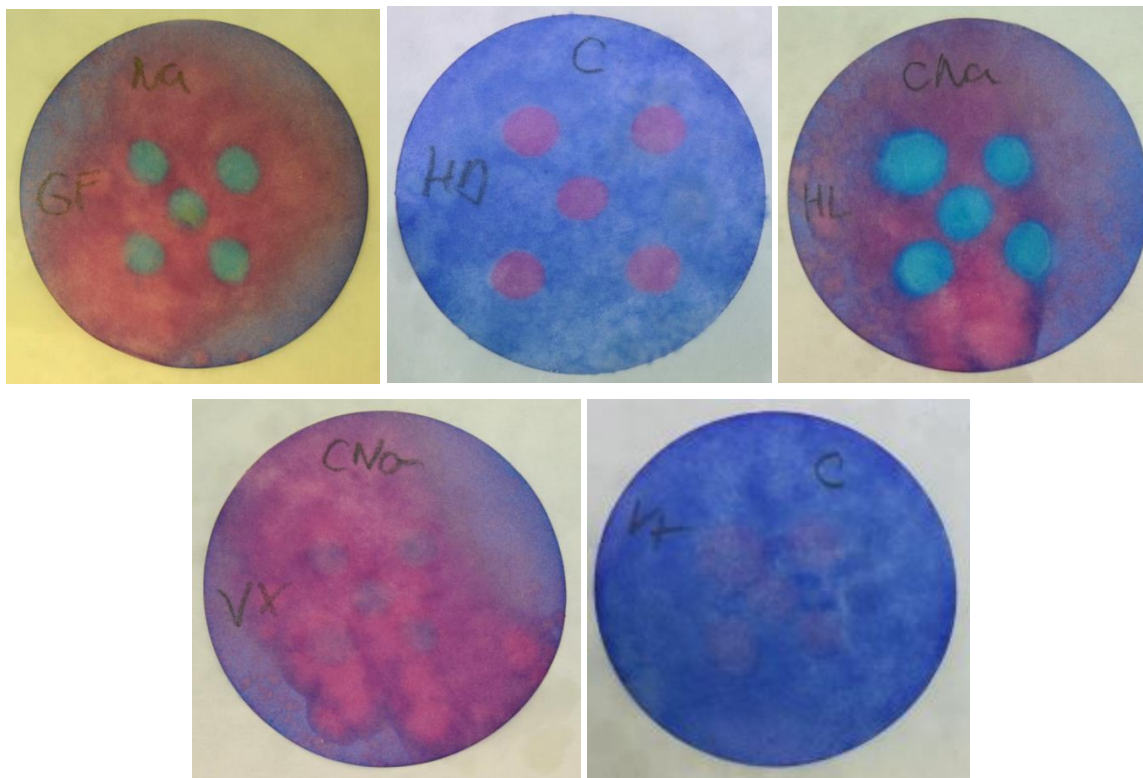
Testování proběhlo během dvou týdnů za stejných podmínek během tří etap. Pro každou z etap byly použity papírky z šarže určené pro využití během konkrétní etapy a rovněž i všechny ostatní roztoky byly připraveny vždy čerstvé.

Výsledky ukazují, že barevná změna je specifická pro každou ze čtyř skupin testovaných látek a v rámci skupiny se výsledky liší minimálně. Na základě tohoto zjištění lze předpokládat, že takto připravený detekční prostředek je schopen odlišit od sebe jednotlivé skupiny BCHL, ale již ne látky v rámci skupiny. Ihned po kápnutí vzorku látky lewisitu případně jeho směsi s yperitem a bez dalšího ovlhčení dochází k vytvoření nazelenalé skvrny v místě kontaktu látky s plochou detektoru (obrázek 1 vlevo). Další látky ze skupiny G, H a V pak ihned po nakápnutí nevytváří žádnou barevnou změnu (obrázek 1 vpravo) a teprve po dodatečném ovlhčení látky ze skupiny G vytvoří modré skvrny, látky ze skupiny H pak skvrny červené a látka VX pak relativně nevýrazné skvrny, jejichž barva se liší podle roztoku, jímž byl papír dodatečně ovlhčen (obrázek 2).

Obrázek 1: Ukázka barevných změn po nakápnutí BCHL před ovlhčením u lewisitu (vlevo) a u somanu (vpravo) u něžž vypadají skvrny podobně jako u ostatních 9 látek neobsahujících lewisit



Obrázek 2: Ukázka barevných změn pro látky (první řada zleva) cyklosarin ovlhčený roztokem Na, yperit ovlhčený roztokem C, směs yperit-lewisit (eutektická směs) ovlhčená roztokem CNa a látka VX v roztoku CNa a C (dole zleva)



4. DISKUZE

V rámci řešení projektu byla provedena expozice plošných nosičů impregnovaných indikátorem Nile Blue A zástupcům všech skupin BCHL. Výsledky poukazují na skupinovou specifičnost barevných změn a tedy i schopnost odlišit od sebe na základě barevných změn zástupce těchto látek mezi sebou. Další pozornost v experimentech bude věnována zkoušení vlivu matrice na detekční mechanismus, kdy budou za shodných podmínek otestovány různé materiály založené na skelných vláknech nebo filtrační membrány z různých materiálů (PES, PTFE, CA, Nylon, aj.). Dále budou zkoumány a popsány možné rušivé vlivy detekčního mechanismu a pro zástupce z každé skupiny BCHL bude stanoven detekční limit.

Jako další oblasti pro experimentální činnost byly na základě literatury vybrány dva typy indikátorů, jeden pro detekci organofosfátových nervově paralytických látek (NPL) a druhý indikátor schopný detekovat alkylační činidla s potenciálem detekce zpuchřujících BCHL.

Pro detekci organofosfátových NPL byly dle poznatků ze studie [6] připraveny tři deriváty malachitové zeleně, které ve formě svých roztoků reagují na přítomnost simulantů NPL. Další experimenty budou věnovány vyzkoušení expozice reálným NPL a dále případné adaptaci do formy plochého pásku impregnovaného těmito indikátory.

Jako slibné indikátory pro detekci zpuchýřujících látek byly na základě poznatků ve studii [7] syntetizovány deriváty 4-(4-nitrobenzyl)pyridinu, které detekují jiná alkylační činidla, jako jsou například některá léčiva proti rakovině. Rovněž i u těchto látek bude studována funkčnost detekčního mechanismu pro zástupce zpuchýřujících BCHL a případná další adaptace detekčního mechanismu do formy plošného detektoru.

5. ZÁVĚR

Předložený text pojednává především o zkouškách zabývajících se zkoumáním nových možností detekce BCHL na základě jejich interakce s doposud nevyužívanými a tedy i doposud neodzkoušenými indikátory a činidly. Široká skupina těchto látek je rutinně využívána v řadě oblastí chemie a biologie a mnohé látky z této skupiny jsou využívány, byť ve stále menší míře, i jako potravinářská barviva. Další možností jejich využití a jejich další možný potenciál je jako detekční činidlo indikující přítomnost toxických chemických látek v případech vojenského i nevojenského použití, nebo v případě havárií s unikem takovýchto látek do prostředí.

Již dílčí výsledky dokazují, že řada dosud neužívaných činidel má potenciál dále rozšířit nabídku jednoduchých plošných detektorů. Probíhající výzkum a optimalizace nových detekčních pásek pak odráží zájem potenciálních uživatelů na dalším vývoji rychlých a jednoduchých prostředků detekce látek potenciálně ohrožujících život. Žádaným výstupem jsou pak detekční prostředky využitelné všemi, kdo s danou látkou mohou přijít do styku, především pak pro specialisty zasahující při zdolávání mimořádných situací a kohokoliv, kdo při výkonu svého povolání může být těmito látkami negativně ovlivněn.

Poděkování

Výzkum byl realizován v rámci bezpečnostního výzkumu MV ČR: řešení projektu VI20172019101 - Nové detekční pásy ke zjištění kapalných aerosolů bojových chemických látek a jiných toxických sloučenin.

Použitá literatura

- [1] GOTOR, R., ROYO, S., COSTERO, A. M., PARRA, M., GIL, S., MARTÍNEZ-MÁÑEZ, R., & SANCENÓN, F. (2012). Nerve agent simulant detection by using chromogenic triaryl methane cation probes. *Tetrahedron*, 68(41), 8612–8616.
<http://doi.org/10.1016/j.tet.2012.07.091>
- [2] MARTÍ, A., COSTERO, A. M., GAVIÑA, P., & PARRA, M. (2014). Triarylcarbinol functionalized gold nanoparticles for the colorimetric detection of nerve agent simulants. *Tetrahedron Letters*, 55(19), 3093–3096.
<http://doi.org/10.1016/j.tetlet.2014.03.139>
- [3] KIM, Y., JANG, Y. J., LEE, D., KIM, B. S., & CHURCHILL, D. G. (2017). Real nerve agent study assessing pyridyl reactivity: Selective fluorogenic and colorimetric detection of Soman

- and simulant. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 238, 145–149.
<http://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.056>
- [4] BUI, M. P. N., & ABBAS, A. (2015). Simple and rapid colorimetric detection of p-nitrophenyl substituent organophosphorous nerve agents. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 207(Part A), 370–374. <http://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.010>
- [5] POHANKA, M., KARASOVÁ, J. Z., KUČA, K., PIKULA, J., HOLAS, O., KORABEČNÝ, J., & CABAL, J. (2010). Colorimetric dipstick for assay of organophosphate pesticides and nerve agents represented by paraoxon, sarin and VX. *Talanta*, 81(1–2), 621–624.
<http://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.12.052>
- [6] BELGER, C., WEIS, J. G., EGAP, E., & SWAGER, T. M. (2015). Colorimetric stimuli-responsive hydrogel polymers for the detection of nerve agent surrogates. *Macromolecules*, 48(21), 7990–7994. <http://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b01406>
- [7] PROVENCHER, P. A., & LOVE, J. A. (2015). Synthesis and Performance of a Biomimetic Indicator for Alkylating Agents. *Journal of Organic Chemistry*, 80(19), 9603–9609.
<http://doi.org/10.1021/acs.joc.5b01584>
- [8] KUMAR, V., RANA, H., RAVIRAJU, G., & GUPTA, A. K. (2018). Chemodosimeter for Selective and Sensitive Chromogenic and Fluorogenic Detection of Mustard Gas for Real Time Analysis. *Analytical Chemistry*, 90(2), 1417–1422.
<http://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04882>
- [9] HU, Y., ZHOU, X., JUNG, H., NAM, S. J., KIM, M. H., & YOON, J. (2018). Colorimetric and Fluorescent Detecting Phosgene by a Second-Generation Chemosensor. *Analytical Chemistry*, 90(5), 3382–3386. <http://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b05011>