

# NOVÁ METODIKA TESTOVÁNÍ DEGRADAČNÍ ÚČINNOSTI PEVNÝCH DEKONTAMINAČNÍCH LÁTEK V HZS ČR

## NEW METHODOLOGY OF TESTING OF THE DEGRADATION EFFICIENCY OF SOLID DECONTAMINATION SUBSTANCES IN THE FIRE RESCUE SERVICE OF THE CR

Tomáš ČAPOUN, Jana KRYKORKOVÁ  
jana.krykorkova@ioolb.izscr.cz

### Abstract

*The paper focuses on testing of solid substances using for decontamination of chemical warfare agents. It describes the development of methodology for the evaluation of the degradation efficiency of sorbents in degradation of chemical warfare agents soman, VX and sulfur mustard. The process of decomposition of chemical warfare agents with solid decontamination agents was monitored by using FTIR spectrometry with the ATR technique. The methodology of testing was the result of study and subsequently was introduced in the FRS CR.*

### Key words

*Chemical warfare agent, decontamination, decontamination substance, degradation efficiency, FTIR spectrometry, ATR technique.*

## 1 ÚVOD

Dekontaminace bojových chemických látek (BCHL) představuje významné opatření aktivní ochrany proti následkům nekontrolovaného úniku BCHL do prostředí či následkům jejich zneužití. Při dekontaminaci jsou využívány metody chemické, fyzikální, fyzikálně-chemické, mechanické a biologické (biodegradace) [1, 2].

Při realizaci dekontaminačních prací mají při všech výše uvedených událostech nezastupitelné místo jednotky HZS krajů [3]. Dekontaminace se provádí v případě nebezpečí ohrožení života, zdraví, majetku nebo životního prostředí, které vyplývá z nebezpečných vlastností kontaminantu a dále z důvodu zamezení šíření BCHL či jiné nebezpečné látky.

Obecně jsou u jednotek HZS krajů využívány všechny známé dekontaminační metody (mechanické, fyzikální a chemické) a způsoby (mokrý a suchý). Z konkrétních postupů dekontaminace chemických látek jsou nejrozšířenější aplikace pevných sorbentů a postřik dekontaminační směsí [4].

V praxi armádních jednotek jsou zpravidla využívány dekontaminační postupy, které jsou kombinací různých metod a přitom využívají rozkladné chemické reakce [2, 5].

## 2 DEKONTAMINAČNÍ SORBENTY

Perspektivní směr rozvoje dekontaminačních látek představují tzv. dekontaminační sorbenty, nazývané též degradační nebo destrukční sorbenty. Tyto látky nejdříve sorbují BCHL do povrchové struktury materiálu, kde následně proběhne chemická rozkladná reakce. Jejich široká využitelnost je spatřována zejména na úseku individuální dekontaminace, která v případě

kontaminace osob představuje zcela zásadní opatření ke snížení následků účinků BCHL na lidský organismus [6, 7].

Ve výzbroji americké armády je od druhé poloviny 80. let zavedena souprava M291 Skin Decontamination Kit [5] se syntetickým sorpčním prostředkem Ambergard XE-555. Trh nabízí také dekontaminační nano-sorbent FAST-ACT, který je určen pro adsorpci, neutralizaci a dekontaminaci širokého spektra kapalných a plynných toxických látek včetně BCHL [8, 9]. Dalším prostředkem se sypkou dekontaminační směsí s degradačním účinkem je souprava polské armády IPP-95 [7].

Praktické experimenty dekontaminace BCHL [10, 11] ukázaly, že ne všechny dekontaminační sorbenty reagují s BCHL na požadovaný stupeň rozkladu. K posouzení využitelnosti pevných látek pro dekontaminaci BCHL je proto nezbytné znát jejich účinnost a postupy jejího testování.

### 3 METODIKY TESTOVÁNÍ DEKONTAMINAČNÍCH LÁTEK A SMĚSÍ ZAVEDENÉ V HZS ČR

Bez ohledu na složení dekontaminačního činidla je třeba k posouzení jeho účinnosti přistupovat ze dvou pohledů, a to z hlediska dekontaminační účinnosti a z hlediska degradační účinnosti. Přitom není racionální preferovat pouze některý z nich. Např. směs, která sice na jedné straně účinně a rychle rozkládá kontaminant, ale na druhé straně nesmáčí kontaminované povrchy, není zárukou dostatečně účinné dekontaminace [12].

Cílem stanovení **dekontaminační účinnosti** je zjištění podílu původního množství BCHL na povrchu, který je schopna testovaná dekontaminační látka za předepsaných zkušebních podmínek odstranit ze zkušebního povrchu [10, 11, 13]. Proveďte se kontaminace zkušebního povrchu kapkami BCHL na hodnotu výchozí hustoty kontaminace. Po určité době expozice je na povrch aplikována dekontaminační látka v předepsaném množství. Po dané době působení se látka odstraní z povrchu (sklepáním, oplachem vodou apod.). Proveďte se odběr vzorku povrchu a zvolenou analýzou se stanoví celková zbytková kontaminace danou BCHL. Tato hodnota je sama o sobě měřítkem dekontaminační účinnosti a většinou se porovnává s přípustnou zbytkovou kontaminací. Dále se účinnost vyjadřuje hodnotou tzv. dekontaminační účinnosti, která vyjadřuje procentuální podíl původního množství kontaminantu odstraněného z povrchu. V HZS ČR jsou zavedeny postupy zkoušení dekontaminační účinnosti na BCHL v laboratorním [14] a poloprodučním [15] měřítku.

Předmětem testování **degradační účinnosti** je určení stupně rozkladu BCHL účinkem dekontaminační látky. Zkoušení degradační účinnosti je jednodušší v případě kapalných dekontaminačních směsí, neboť se jedná o homogenní reakci s kapalnou BCHL. Pro tento typ reakce je v HZS ČR zavedena certifikovaná metodika [16].

Reakce kapalně BCHL s pevnou dekontaminační látkou však představuje heterogenní reakci, která vyžaduje speciální postup, jehož vývoj je předmětem tohoto sdělení. Metodika hodnocení degradační účinnosti pevných dekontaminačních látek dosud v HZS ČR chyběla.

Pozornost byla obrácena na metodu infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR spektrometrie) s reflexní měřicí technikou ATR (Attenuated Total Reflection – tlumená totální reflexe). Postup využívá infračervená spektra směsí BCHL s dekontaminačním sorbentem, změřená proti samotnému sorbentu, k určení stupně rozkladu BCHL na základě intenzity určitého absorpčního pásu. K určení intenzity pásu byla využita korigovaná plocha absorpčního pásu, která byla zjišťována ve spektroskopickém programu OMNIC [17]. Vyhodnocení všech měření byla prováděna tak, že se body základní linie shodovaly s mezemi rozsahu vlnočtů pro odečet plochy, jak je ukázáno na obr. 1.

Základním předpokladem využití FTIR spektrometrie pro studium rozkladu BCHL je znalost vazeb, které se při reakci rozkládají, a polohy absorpčních pásů, které vibracím této vazby přísluší. Nalezení těchto vazeb a pásů bylo hlavním cílem práce.

#### 4 PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ

Metodika byla vyvíjena pro sledování rozkladu následujících BCHL: (3,3-dimethylbutan-2-yl)-metylfosfonofluoridát (soman), VVÚ Brno, ČR, čistota látky 97 % stanovena odměrnou lanthanometrickou metodou indikovanou potenciometricky fluoridovou iontově selektivní elektrodou; S-[2-(diisopropylamino)ethyl]-O-ethyl-metylfosfonothioát (VX), VOZ 072 Zemianské Kostolany, Slovensko, čistota látky 83 % stanovena odměrnou thiomerkurimetrickou metodou indikovanou potenciometricky sulfidovou iontově selektivní elektrodou; bis(2-chlorethyl)sulfid (sulfidický yperit), VOZ 072 Zemianské Kostolany, Slovensko, čistota látky 98 % stanovena odměrnou argentometrickou metodou indikovanou potenciometricky stříbrnou iontově selektivní elektrodou.

Postup hodnocení degradační účinnosti byl ověřen pro dekontaminační nano-sorbent FAST-ACT (NanoScale Corp., USA, exp. 10/2017) a pět vzorků dekontaminačních sorbentů vyvíjených v ČR pod pracovním označením LB1, LB2, LB3, LB4, LB5.

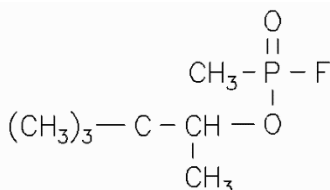
Při měření bylo postupováno tak, že do skleněné vialky objemu 4 ml bylo odváženo 0,10 g testovaného dekontaminačního sorbentu. Na sorbent bylo Hamiltonovou stříkačkou přidáno množství BCHL odpovídající 0,02 g čisté látky a byly spuštěny stopky. Směs byla ve vialce dokonale promísená špachtlí, část byla nanesena na ATR nástavec FTIR spektrometru a do 1 minuty bylo změřeno infračervené spektrum, které odpovídá času 0 minut. Dále bylo měřeno spektrum směsi ve zvolených časových intervalech až do doby reakce 120 minut.

Jako background byl metodou FTIR spektrometrie technikou ATR změřen samotný dekontaminační sorbent.

Měření IR spekter byla prováděna na FTIR spektrometru NICOLET iS10 (Thermo Scientific, USA) s jednodrazovým ATR nástavcem a diamantovým krystalem (GladíATR Vision). Směsi sorbentů s BCHL byly měřeny při následujících parametrech: počet scanů 32, měřicí rozsah 4000–400 cm<sup>-1</sup>, rozlišení 4 cm<sup>-1</sup>, zesílení signálu 4.

#### 5 VÝVOJ POSTUPU TESTOVÁNÍ DEGRADAČNÍ ÚČINNOSTI DEKONTAMINAČNÍCH SORBENTŮ

##### 5.1 Soman

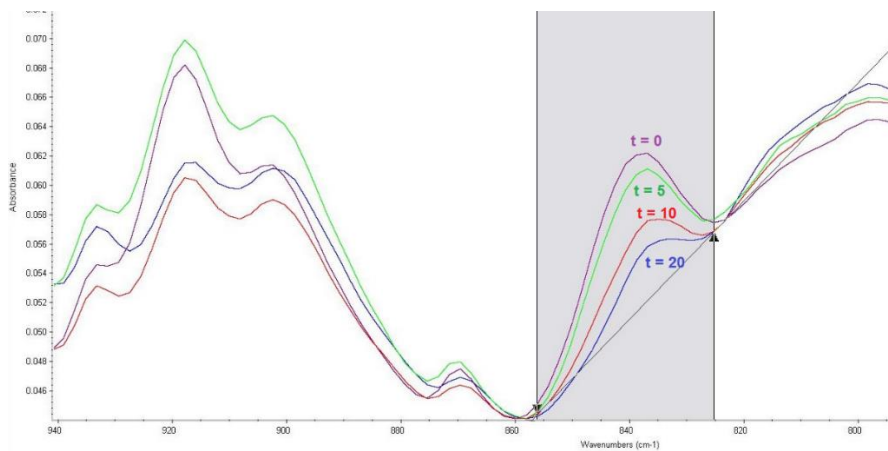


Ze strukturního vzorce somanu vyplývá, že vzniká na vazbě P–F výrazná dispozice k reakcím s nukleofilními činidly. Nukleofilní náhrada fluoru vede k produktům podstatně méně toxickým a je vhodná k rozkladu somanu [18]. Elektrofilní činidla jsou vůči somanu již méně reaktivní. Atomy kyslíku a fluoru nesou sice dílčí (parciální) záporné náboje, ale

vzhledem ke své silné elektronegativitě velmi neochotně poskytují volné elektronové páry vnějších sfér svých elektronových obalů. Nicméně důležité je, že výsledkem reakce s elektrofilním činidlem je opět odštěpení fluoridového aniontu, čímž je dosaženo potřebného rozkladu somanu [19].

Je k tomu nutné připomenout, že vazba P–F je také odpovědná za toxicitu somanu, který způsobuje inhibici cholinesterázy za odštěpení fluoridového aniontu. Inhibicí cholinesterázy dochází ke kumulaci acetylcholinu na receptorech s následným dlouhodobým nadměrným drážděním cholinergních receptorů. Klinickým důsledkem jsou muskarinové, nikotinové a centrální klinické příznaky [19].

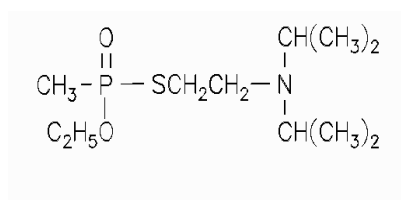
Základní otázkou pro studium rozkladu somanu je tedy jednoznačně vazba P–F. V infračerveném spektru se obecně absorpční pásy vibrační vazby P–F vyskytují při vlnočtech 1010–500  $\text{cm}^{-1}$  [20]. Ze spekter směsí somanu se sorbentem, změřených při různých dobách reakce, byl jako optimální zvolen pás s maximem absorpce 840  $\text{cm}^{-1}$ . Příklad je na obr. 1. Plocha pásu byla odečítána v rozmezí vlnočtů 856–825  $\text{cm}^{-1}$ , body základní linie byly stejné. Při studiu rušivých vlivů byly produkty rozkladu somanu identifikovány metodou GC/MS [21, 22]. Rozkladnými produkty jsou v zásadě sloučeniny, které vznikají z 3,3-dimethyl-2-butylové skupiny odštěpené z molekuly somanu (převážně alkeny, dieny, chlorderiváty, alkoholy, ketony), dále byl identifikován bis(3,3-dimethyl-2-butyl)methylfosfonát. Pro vlastní postup je důležité, že mezi rozkladnými produkty není žádná látka s vazbou P–F, která by sledování průběhu rozkladné reakce somanu rušila.



Obr. 1

Vliv doby reakce ( $t$ , min) somanu se sorbentem FAST-ACT na absorpční pás odpovídající vibrační vazby P–F

## 5.2 Látka VX

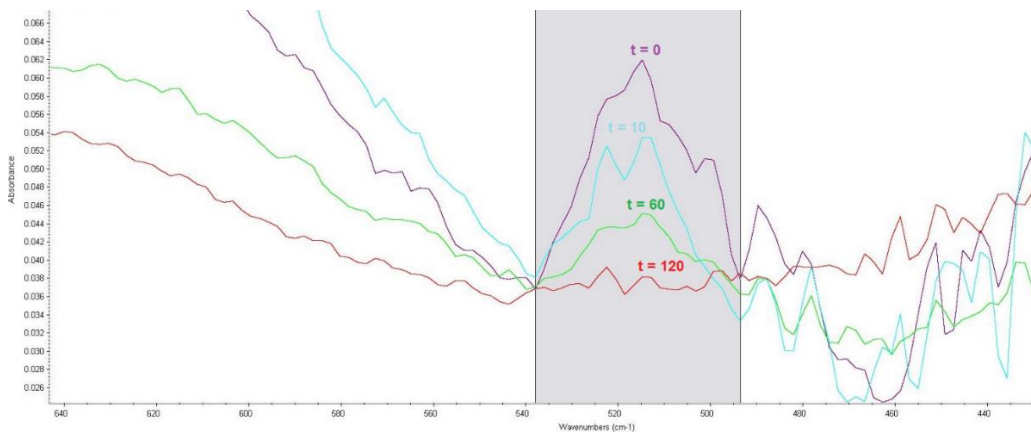


Z porovnání struktury látky VX se strukturním vzorcem somanu vyplývá, že hlavní změnou v molekule je záměna silně elektronegativního fluoru daleko méně elektronegativní diisopropylaminoethanthiolovou skupinou. Z toho je pak zřejmá v porovnání se somanem podstatně nižší dispozice k reakcím s nukleofilními činidly na vazbě P–S [18]. Podobně jako u somanu se nukleofilní substitucí štěpí vazba P–S přímo za uvolnění diisopropylaminoethanthiolové skupiny.

Pro rozklad látky VX mají proti BCHL typu somanu značný význam i reakce s elektrofilními činidly, která sice neštěpí vazbu P–S přímo, ale podstatně ovlivňují následnou reakci s nukleofilními činidly. Průběh reakce tohoto typu závisí na druhu elektrofilního činidla [18]. V každém případě je výsledným efektem rozštěpení vazby P–S.

V infračerveném spektru leží obecně absorpční pásy vibrační vazby P–S(C) ve sloučeninách s vazbou P=O při 613 až 510  $\text{cm}^{-1}$  [20]. Ke sledování rozkladu látky VX byl zvolen pás s maximem absorbance při 515  $\text{cm}^{-1}$ . Příklad je ukázán na obr. 2. Korigovaná plocha pásu byla odečítána v rozmezí vlnočtů 538–494  $\text{cm}^{-1}$ .

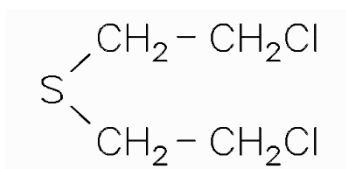
K rušivým vlivům je třeba uvést, že mezi rozkladnými produkty, které byly identifikovány metodou GC/MS [21, 22], byly ve stopách přítomny O,S-diethylmethylthiofosfonát, O-methyl-S-(diisopropylaminoethyl)ethylthiofosfonát a O-ethyl-S-(diisopropylaminoethyl)methylthiofosfonát. Tyto látky s vazbou P–S však byly nalezeny pouze v reakčních produktech látky VX s nejméně účinným sorbentem. Může se jednat o látky, které jsou při rozkladu přechodnými meziproducty a mohou tak zkreslit měření na počátku reakce. Vzhledem k minimálnímu množství ve směsi lze předpokládat jen zanedbatelné ovlivnění výsledků. V největším množství byly jako rozkladné produkty identifikovány sekundární a terciární aminy a diaminy, thioly, sulfidy, disulfidy a alkoholy s diisopropylými a diisopropylaminoethylými skupinami. Tyto látky neobsahují vazbu P–S, a tak neruší sledování rozkladu látky VX.



Obr. 2

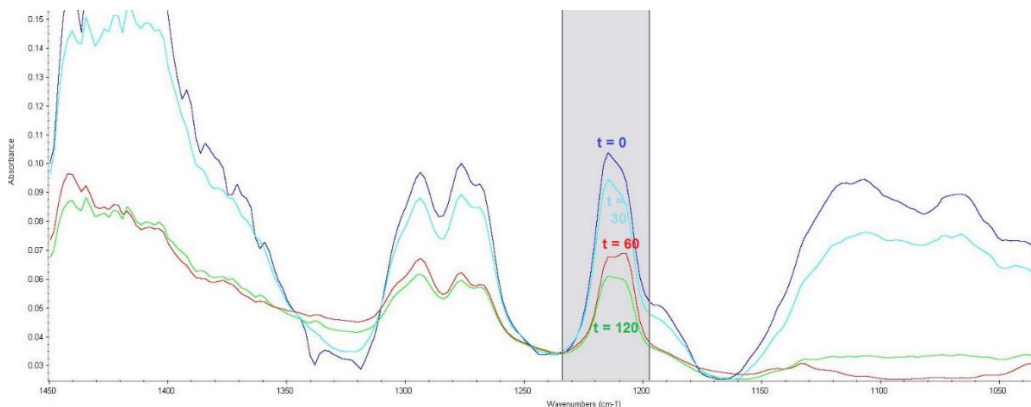
*Vliv doby reakce ( $t$ , min) látky VX se sorbentem LB4 na absorpční pás odpovídající vibrační vazby P–S(C)*

### 5.3 Sulfidický yperit



Po chemické stránce představuje yperit současně alkylchlorid a dialkylsulfid. Nejpolarnější vazbou je vazba mezi atomem uhlíku a chloru [18]. Dvoustupňovou reakcí dochází k substituci obou atomů chloru nukleofilními činidly za vzniku sloučenin typu: Nu-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-S-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-Nu, které jsou málo toxické nebo netoxické (podle druhu nukleofilu). Štěpení vazby C-Cl jako kineticky řídicí děj je za normálních podmínek velmi pomalé, takže se k jeho urychlení využívají reakce elektrofilního ataku na atomu síry. Pro sledování rozkladu yperitu je tak třeba se zaměřit na vazbu C-Cl. Vazba C-Cl je také hlavní příčinou toxicity yperitu, neboť na organismus působí jako alkylační činidlo [19].

Absorpční pásy odpovídající vibracím vazby C-Cl se nacházejí v široké oblasti 850–550 cm<sup>-1</sup>, kde se velmi obtížně interpretují [23]. Molekula sulfidického yperitu však obsahuje skupiny CH<sub>2</sub>-Cl, které poskytují intenzivní pásy v oblasti 1300–1150 cm<sup>-1</sup> [23]. Experimentálním ověřením byl pro yperit tento pás zjištěn při vlnočetě s maximem absorbance 1207 cm<sup>-1</sup>. Korigovaná plocha pásu byla odečítána v rozsahu vlnočtů 1234–1198 cm<sup>-1</sup>, příklad ukazuje obr. 3.



Obr. 3

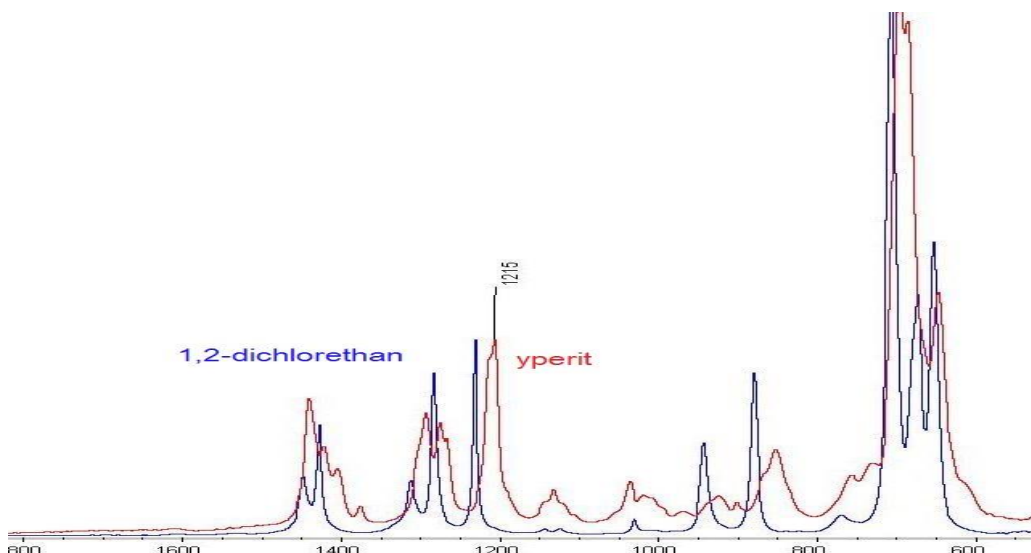
*Vliv doby reakce (t, min) sulfidického yperitu se sorbentem LB3 na absorpční pás odpovídající vibracím vazby CH<sub>2</sub>-Cl*

GC/MS analýzou produktů rozkladu sulfidického yperitu dekontaminačními sorbenty [21, 22] bylo zjištěno, že převládají dithian, thiiran, divinylsulfid, oxathian, oxathiolan, thiofen a jejich deriváty. Vedle nich byly identifikovány čtyři látky s vazbou CH<sub>2</sub>-Cl, které by mohly potenciálně rušit stanovení degradační účinnosti.

První je 1,2-dichlorethan. Jak ukazuje porovnání infračervených spekter na obr. 4, dichlorethan vlastní měření yperitu neruší, protože maximum absorpčního pásu příslušejícího vibracím vazby CH<sub>2</sub>-Cl je proti yperitu posunuto k vyšším vlnočtům.

Druhou látkou je 2-chlorethylvinylsulfid. Tato látka byla identifikována jenom ve stopových množstvích a jen u některých sorbentů. Jedná se o přechodný produkt, který dále reaguje na divinylsulfid. Rušivý vliv 2-chlorethylvinylsulfidu na celkové hodnocení degradační účinnosti lze tak zanedbat a je možno předpokládat, že by se mohl v malé míře uplatnit pouze na počátku reakce.

Dalšími produkty reakce některých sorbentů jsou bis(2-chlorethyl)ether a bis(2-chlorethyl)disulfid. Patří mezi vysoce toxické látky, takže přítomnost v rozkladných produktech indikuje nedostatečnou účinnost sorbentu k rozkladu na netoxické produkty.



Obr. 4

Porovnání infračervených spekter sulfidického yperitu a 1,2-dichlorethanu (měřeno technikou ATR)

#### 5.4 Eliminace odpařování bojové chemické látky

V průběhu ověřování měření bylo zjištěno, že s časem postupně klesá intenzita všech absorpčních pásů ve spektru. Tento jev nenastává v důsledku rozkladu látky, ale z jiných důvodů, zřejmě postupnou desorpci látek ze sorbentu a odpařováním.

K eliminaci tohoto jevu bylo nutné na základě výsledků měření pro každou látku vybrat absorpční pásy, jejichž intenzita vykazuje vysoký stupeň stability. Takových je ve spektru celá řada, přičemž nejvhodnější jsou pásy odpovídající vibračním skupinám  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}$ , kterých by se rozkladná reakce neměla prakticky týkat. Snižování intenzity těchto pásů tak lze přisuzovat pouze fyzikálním jevům a nikoliv chemické reakci se sorbentem.

Intenzita pásů odpovídajícího sledované vazbě se pak vztahuje k intenzitě pásů příslušejícímu vibračním uvedených skupin (tzv. referenční absorpční pás). K vlastnímu hodnocení proto byl využit poměr korigovaných ploch pásů těchto stabilních pásů vůči sledovanému pásu BChL. Rozsahy vlnových délek referenčních pásů uvádí tab. 1.

## 6 METODIKA TESTOVÁNÍ DEGRADAČNÍ ÚČINNOSTI PEVNÝCH DEKONTAMINAČNÍCH LÁTEK

Výsledkem optimalizace sledování rozkladu BCHL účinkem dekontaminačních sorbentů je následující postup [21, 24]:

- Měření backgroundu a směsi sorbentu s BCHL ve zvolených časových intervalech se provede podle části 4.
- U všech změřených spekter se pomocí příslušného software odečtou plochy pásů sledované vazby ( $S_t$ ) a referenční vazby ( $S_{ref}$ ) v rozsahu vlnočtů podle tab. 1.
- Pro každý čas se vypočítá poměr ploch  $Y_t = S_t / S_{ref}$ . Pro spektrum odpovídající času 0 minut je poměr označen  $Y_0 = S_0 / S_{ref}$ .
- Podíl rozložené BCHL (PRL) se vypočítá ze vztahu:  $PRL [\%] = (Y_0 - Y_t) \cdot 100 / Y_0$ .
- Sestrojí se závislost podílu rozložené BCHL v procentech na čase.

Tabulka 1

Rozsahy vlnočtů k určení ploch absorpčních pásů a body pro nastavení základní linie

Látka	Soman	VX	Sulfidický yperit
Pás sledované vazby, $\text{cm}^{-1}$	856 – 825	538 – 494	1234 – 1198
Referenční pás, $\text{cm}^{-1}$	3012 – 2887	990 – 910	1320 – 1250

Příklad zpracování výsledků měření pro rozklad somanu účinkem dekontaminačního sorbentu LB3 uvádí tab. 2, příslušnou grafickou časovou závislost uvádí obr. 5.

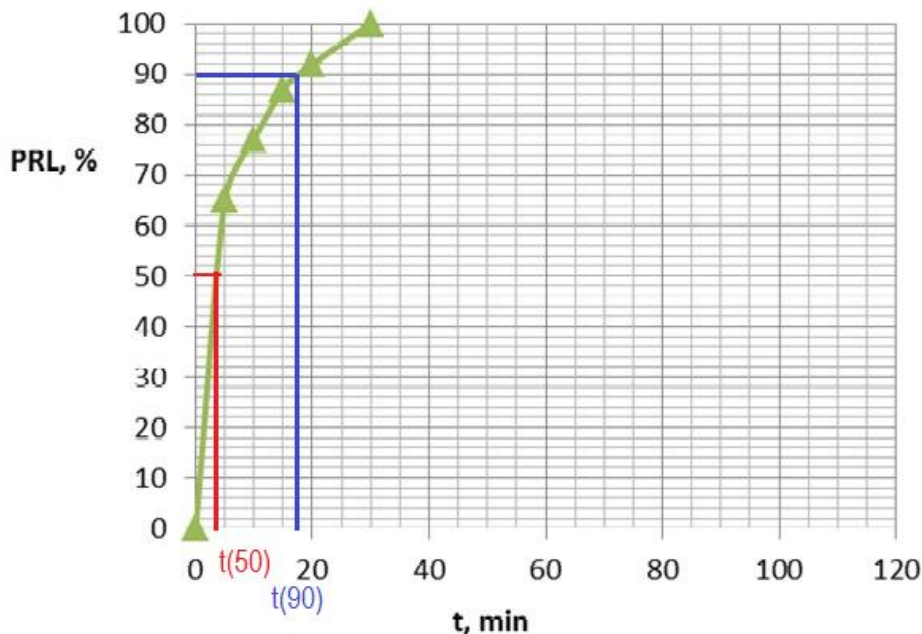
Uvedená grafická závislost umožňuje popsat degradační účinnost sorbentů také kvantitativními charakteristikami. Pro tyto účely byly vyjádřeny časy potřebné k 50% ( $t_{50}$ ) a 90% ( $t_{90}$ ) rozkladu BCHL. Tyto časy se určují extrapolací z grafických závislostí, jak je ukázáno na obr. 5. Tímto způsobem umožňují nastavené experimentální podmínky vyjádřit rozdíly mezi jednotlivými dekontaminačními sorbenty a názorně charakterizovat jejich degradační účinnost.

Tabulka 2

Výsledky sledování průběhu rozkladu somanu dekontaminační látkou LB3

t, min.	0	5	10	15	20	30
$S_t$ (860–820 $\text{cm}^{-1}$ )	0,42	0,13	0,079	0,035	0,021	0
$S_{ref}$ (3012–2887 $\text{cm}^{-1}$ )	1,15	0,97	0,93	0,74	0,69	0,63
$Y = S_t / S_{ref}$	0,37	0,13	0,085	0,047	0,030	0
<b>PRL, %</b>	<b>0</b>	<b>65</b>	<b>77</b>	<b>87</b>	<b>92</b>	<b>100</b>





Obr. 5

Závislost podílu rozloženého somanu na době reakce s dekontaminační látkou LB3 (poměr BCHL / sorbent 1:5)

## 7 ZÁVĚR

Pro potřeby objektivního hodnocení vlastností dekontaminačních sorbentů byla vypracována metodika testování jejich degradační účinnosti při rozkladu BCHL somanu, látky VX a sulfidického yperitu. Výsledkem testování jsou jednak grafické závislosti podílu rozložené BCHL na čase a dále reakční doby potřebné k rozkladu 50 a 90 % původního množství látky. Metodika testování je založena na měření infračervených spekter směsi BCHL – sorbent v určitých časových intervalech technikou ATR a využití velikosti ploch charakteristických absorpčních pásů BCHL ke kvantifikaci jejich úbytku.

### Résumé

*For objective evaluation of the properties of decontamination sorbents was developed the methodology of testing their degradation efficiency in decomposition of chemical warfare agents (CWA) soman, VX and sulfur mustard. The results of measurement are proportion of degradation product of CWA as function of time and also time of decomposition of 50 and 90 % starting quantity of substance. The methodology is based on measurement of infrared spectra of mixture the chemical warfare agent-sorbent at certain time intervals by ATR technique and on utilizing the areas size of characteristic absorption bands of chemical warfare agents for quantification of their loss.*

Článek vznikl v rámci řešení projektu „VI20152020009 – Cílený aplikovaný výzkum nových moderních technologií, metod a postupů ke zvýšení úrovně schopností HZS ČR – CAVHZS“.

## Literatura

- [1] HURST, C. G. Decontamination. In: SIDELL, F. R., E. T. Takafuji, D. R. Franz, eds. *Medical Aspects of Chemical and Biological Warfare*. Washington, DC, USA: The Office of The Surgeon General Department of the Army, Borden Institute, 1997, p. 351–359.
- [2] SKALIČAN, Z. Dekontaminace. In: PITSCHMANN, V., ed. *Chemické zbraně a ochrana proti nim*. Praha: Manus, 2011, s. 135–161. ISBN 978-80-86571-09-6.
- [3] *Řád chemické služby Hasičského záchranného sboru ČR*. Praha: MV – GŘ HZS ČR, 2007, 112 s. ISBN 80-86640-70-1.
- [4] ČAPOUN, T., D. KALA, J. SEVERA, Z. FIŠER. *Zhodnocení možností a potřeb hasičských jednotek při provádění dekontaminace. Část detoxikace*. [Výzkumná zpráva]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2002. 78 s.
- [5] GIBSON, N., M. ROVERY. *IHD Jane's EOD & CBRNE Defence Equipment 2012–2013*. Coulsdon, UK: IHS Jane's, IHS Global Limited, 2012, p. 777–786. ISBN 978-0-71-063007-0.
- [6] GORDON, R. K., E. D. CLARKSON. Rapid Decontamination of Chemical Warfare Agents. In: GUPTA, R.C., ed. *Handbook of Toxicology Chemical Warfare Agents*. London, UK: Academic Press Elsevier, 2009, p. 1069–1081. ISBN 978-0-12-374484-5.
- [7] CABAL, J. Primární dekontaminace osob. In: PITSCHMANN, V., ed. *Chemické zbraně a ochrana proti nim*. Praha: Manus, 2011, s. 162–170. ISBN 978-80-86571-09-6.
- [8] LANZ, B. E., T. ALLEN. *Metal Oxide Decontamination of Warfare Agents*. Patent No. WO2004108172, 16 December 2004, p. 12–16.
- [9] NanoScale Corporation User manual. In: *Chemical Hazard Containment and Neutralization System*. Manhattan, NJ, USA: NanoScale Corporation, 2010.
- [10] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. Comparison of Selected Methods for Individual Decontamination of Chemical Warfare Agents. *Toxics*. 2014, Vol. 2, issue 2, p. 307–326.
- [11] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. *Comparison of Selected Procedures and Means of Personal Decontamination*. Lázně Bohdaneč: Ministry of Interior – General Directory of Fire & Rescue Service of the CR, Population Protection Institute, 2013, p. 42–64. ISBN 978-80-86466-49-1.
- [12] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. *Hodnocení účinnosti dekontaminačních látek a směsí používaných jednotkami HZS krajů*. [Výzkumná zpráva]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2015. 53 s.
- [13] MARTENS, H., K. GÖRGENS. Technical Aspects of Large-Scale Decontamination. In: *Proceedings of the 4th. International Symposium on Protection Against Chemical Warfare Agents*. Stockholm, Sweden. 8–12 June 1992, p. 113–119.
- [14] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. *Metodika laboratorních zkoušek stanovení dekontaminační účinnosti látek a směsí na površích kontaminovaných bojovými chemickými látkami*. [Metodika certifikovaná komisí MV – GŘ HZS ČR, č. osv. CERO 4/2016 ze dne 28. 6. 2016]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2016. 12 s.
- [15] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. *Metodika poloprovozních zkoušek stanovení dekontaminační účinnosti látek a směsí na površích kontaminovaných bojovými chemickými látkami*. [Metodika certifikovaná komisí MV – GŘ HZS ČR, č. osv. CERO 5/2016 ze dne 28. 6. 2016]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2016. 12 s.

- [16] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. *Metodika hodnocení degradační účinnosti kapalných dekontaminačních směsí na bojové chemické látky*. [Metodika certifikovaná komisí MV – GŘ HZS ČR, č. osv. CERO 6/2016 ze dne 28. 6. 2016]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2016. 8 s.
- [17] *Spektroskopický software OMNIC 8*. Praha: Nicolet CZ, 2008.
- [18] DVOŘÁK, J. *Speciální očišťa. Odmořování OL*. Vyškov: VVŠ PV, 1992.
- [19] PATOČKA, J. aj. *Vojenská toxikologie*. Praha: Grada Publishing, 2004. ISBN 80-247-0608-3.
- [20] *Analýza vysoce toxických látek v chemických laboratořích HZS ČR*. Příloha č. 10: Infračervená spektrometrie. [Pokyn generálního ředitele HZS ČR a náměstka ministra vnitra č. 30/2002]. Praha: MV – GŘ HZS ČR, s. 13-14.
- [21] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ, P. LOČÁRKOVÁ. *Testování degradační účinnosti pevných látek na bojové chemické látky*. [Výzkumná zpráva]. Lázně Bohdaneč: MV – GŘ HZS ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2015. 63 s.
- [22] ČAPOUN, T., J. KRYKORKOVÁ. Využití FTIR spektrometrie pro studium rozkladu bojových chemických látek účinkem pevných látek. In: *Sborník mezinárodní vědecké konference CBRN Protect 2017*. Brno, Vyškov: Univerzita obrany, Ústav OPZHN, 2017, s. 6–15. ISBN 978-80-7231-413-3.
- [23] SILVERSTEIN, R. M., G. C. BASSLER, T. C. MORRILL. *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc., 1974. 211 p.