PROJEKT QUIXOTE: "TECHNOLOGIE PRO DEKONTAMINACI B A C LÁTEK POMOCÍ STUDENÉ PLASMY"

THE QUIXOTE PROJECT: "QUICK XOR TECHNOLOGY FOR B&C COLD-PLASMA DECONTAMINATION"

Karel Mazanec[a]*, Roman Šmíd[a]

[a]Vojenský výzkumný ústav, s. p., Veslařská 230, 637 00 Brno, Česká republika
Korespondující autor. e-mail: mazanec@vvubrno.cz, tel.: +420 532 191 341

Abstrakt

Projekt QUIXOTE financovaný Evropskou obrannou agenturou (v rámci programu CBRN-JIP) byl zaměřen na vývoj a otestování zařízení pro dekontaminaci B a C látek s pomocí studené plasmy. Řešení projektu se věnovalo šestičlenné mezinárodní konsorcium, jehož členové pocházeli jak z vojenské, tak civilní oblasti ze Španělska, České republiky, Rakouska a Polska. V rámci řešení projektu byly postaveny prototypy využívající dvě různé techniky: komoru pro plasmu za atmosférického tlaku a trysku pro plasmu za atmosférického tlaku. Technologie dekontaminace studenou plasmou je ekologicky šetrná, bezodpadová a vhodná pro citlivé povrchy. Vojenský výzkumný ústav, s. p. byl zodpovědný za posouzení dekontaminační účinnosti vyvinutého prototypu za použití 5 různých reálných BCHL. Dosažené výsledky a získané poznatky při těchto testech jsou uvedeny v tomto článku.

Klíčová slova: *dekontaminace, studená plasma, BCHL*

Abstract

The QUIXOTE project was aimed to develop a Biological and Chemical decontamination equipment form "state of the art" of Non Thermal Plasma, NTP (or also called "cold plasma") technology, and setting out the technique´s feasibility and scalability as well as evaluating its effectiveness compared to existing responses. The developed NTP devices enable to act effectively on all types of biological and chemical threat agents, in extreme operational environment, over diverse type of samples (surfaces or substrates) by using different "cold plasma" techniques: Atmospheric Pressure Plasma Chamber (APPC) and Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ). The project has been financed by the CBRN-JIP (contract A-1152-RT-GP). Six consortium members from the military and civilian spheres were carefully selected on the basis of specialist skills and areas of technical expertise deemed 'key' to project outcomes, and representing Spain, Poland, Czech Republic and Austria. The technology is clean and green with a bare minimum of environmentally damaging by products. Military Research Institute, was responsible for evaluation of the decontamination efficiency of the developed prototype using 5 different real CWA. The obtained results are presented in the article.

Key words: *decontamination, cold-plasma, chemical warfare agent*

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

1. ÚVOD

Cílem projektu QUIXOTE podporovaného Evropskou obrannou agenturou (EDA) bylo vyvinout a na reálných vzorcích otestovat zařízení založené na technologii studené plasmy pro dekontaminaci chemických a biologických látek. Řešením problematiky se v letech 2014-2017 zabývalo mezinárodní konsorcium šesti institucí ze čtyř evropských zemí pod vedením španělské společnosti IBATECH. Dalšími partnery byly Titania SA (Valencie, Španělsko), Vojenský výzkumný ústav, s. p. (Brno, Česká republika), AIT (Vídeň, Rakousko) a polské vojenské ústavy WICHIR a WIHE (Varšava, Polsko). V rámci řešení projektu byly vyvinuty a vyrobeny 2 prototypy zařízení (komora, tryska), které byly otestovány vůči reálným chemickým a biologickým látkám. Úkolem Vojenského výzkumného ústavu bylo zejména otestovat dekontaminační účinnost prototypu komory vůči vybraným reálným BCHL. Tento článek je věnován poznatkům získaným při těchto testech.

V současné době používání metody pro dekontaminaci používané v civilní nebo vojenské oblasti zpravidla zanechávají silnou logistickou stopu ve formě potřeby velkého množství vody, a vyžadující různé speciální zařízení a chemikálie. Hlavním problémem pak stále zůstává nutnost dalšího nakládání s odpadními produkty po dekontaminačním procesu, obsahujícími mnoho toxických a ekologicky škodlivých činitelů. Během posledních několika let bylo věnováno mnoho úsilí hledání technologií, které mohou reagovat na tyto výzvy. Technik, u kterých nedochází k produkci nebezpečného kapalného či pevného odpadu. V tomto smyslu byla netermická plazma (NTP) testována různými subjekty jako dekontaminační alternativa pro celou řadu toxických látek [1-3]. Pro posuzování účinnosti techniky dekontaminace plazmy byly použity různé techniky. Bylo zjištěno, že netermální plazmová technika je vhodná pro čištění barveného povrchu, snižuje účinnost biologických látek a udržuje povrchovou strukturu neporušenou.

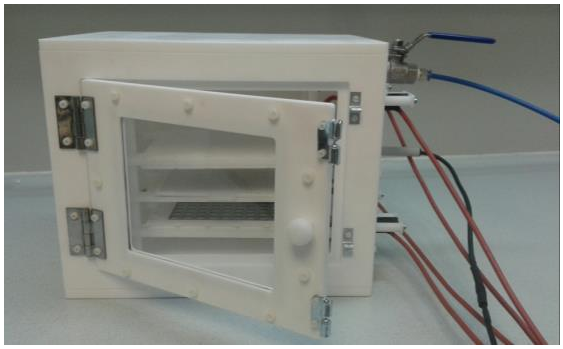
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Komora pro dekontaminaci plazmou za atmosférického tlaku

Komora pro dekontaminaci studenou plazmou za atmosférického tlaku (APPC-NTP) byla vyvinuta a postavena partnerským pracovištěm Titania SA ve Valencii. Celý systém se skládá ze tří základních částí: vlastní komora, řídící obslužný modul s vybavením pro generování plazmy a systém pro úpravu vzduchu. Pracovní komora o rozměrech 32x27x23 cm a vnitřním objemu 17,5 dm^3 s dvířky byla vyrobena z teflonu a. Uvnitř komory je umístěna dvojice SMD elektrod pro generování plazmy. Elektrody jsou ve vzdálenosti 43,2 mm, mezi ně se pak umisťuje plato se vzorky. Vzduch uvnitř komory je ionizován mikrovýboji v SMD elektrodách. Každá elektroda se skládá ze tří vrstev: silová elektroda (mosaz), dielektrikum (teflon) a zemnící elektroda (nerezová ocel). Netermální plazma, která sestává v podstatě z různých částic jako ionty, elektrony, reaktivní částice NOx, Ox, apod., pak působí přímo na vzorky umístěné uvnitř komory. Pracovní komora byla v průběhu testů umístěna v digestoři. Řídící jednotka sestávající z průmyslového PC s dotykovou obrazovkou a obslužným softwarem, 20kV vysokonapěťového zesilovače a vlnového generátoru a systém pro úpravu (sušení) vzduchu byly umístěny v dosahu

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

vedle digestoře. Na obrázku 1 je celý systém umístěn v laboratořích VVU, s. p. v průběhu testů, a detail pracovní komory.



Obrázek 1: Kompletní APPC-NTP systém v laboratořích VVU, s. p. v průběhu testů (vlevo). Detail pracovní komory (vpravo).

2.1 Zkušební povrchy a jejich kontaminace

Použitá metoda pro ověření dekontaminační účinnosti prototypu APPC-NTP vychází přímo ze standardizované metody definované v alianční literatuře, zejména STANAG 4653 [4,5,6]. V průběhu zkoušek byla ověřována dekontaminační účinnost při dekontaminaci následujících bojových chemických látek:

- Sulfidický yperit, HD [bis(2-chlorethyl)sulfid] (čistota 97 %).
- Látka VX [O-ethyl-S-(diisopropylaminoethyl)methylthiofosfonát] (čistota 87 %).
- Tabun, GA [ethyl-(dimethylamido)fosforokyanidát] (čistota 98 %).
- Soman, GD [(3,3-dimethylbutan-2-yl)-methylfosfonofluoridát] (čistota 99 %).
- Cyklosarin, GF [O-cyklohexylmetylfluorofosfonát] (čistota 87 %).

Všechny látky byly připraveny na Vojenském výzkumném ústavu, s. p. a jejich čistoty byly ověřeny bezprostředně před testem. Jako zkušební povrchy byl zvoleny následující materiály:

- Textilie pro NBC ochranné oděvy
- Butylkaučuk
- Ocelový plech bez povrchové úpravy
- USB flash disk

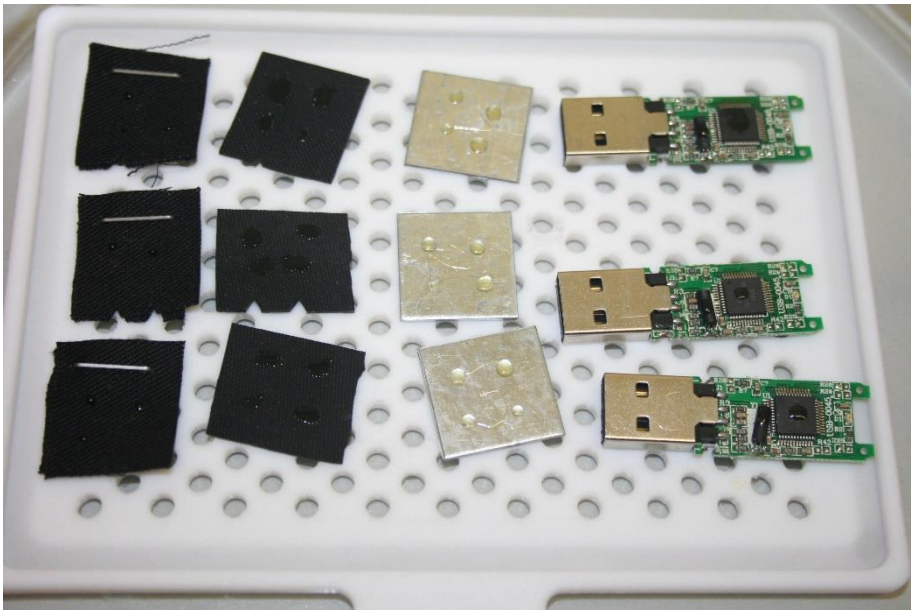
Z vybraných materiálů byly připraveny zkušební vzorky o rozměru 2 x 2 cm. Z USB flash disků byly sejmuty plastové kryty a byla kontaminována přímo základní deska s elektrosoučástkami.

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

Vzorky byly před vlastním testem kondicionovány při teplotě 23±1 ºC a relat. Vlhkosti 50±10 % po dobu alespoň 48 hod. Kondicionované vzorky zkušebních povrchů byly umístěny do Petriho misky a kontaminovány ve vodorovné poloze kapkami čistého kontaminantu o velikosti 1 µl, tak aby bylo dosaženo požadované hustoty kontaminace 10 g/m2. To znamená, že použité zkušební vzorky o velikosti 2x2 cm byly kontaminovány 4 kapkami čisté BCHL. Základní desky USB disků byly vždy kontaminovány na stejných místech. Přesná hodnota hustoty kontaminace pro jednotlivé BCHL je po přepočtu na čistotu a hustotu BCHL uvedena spolu s dosaženými výsledky v tabulce 1. Okamžitě po kontaminaci byly Petriho misky uzavřeny a přeneseny do předem vyhřátého vzdušného termostatu. Vzorky zde byly ve vodorovné poloze temperovány při teplotě 30 ± 2 °C po dobu 60 minut.

2.2 Dekontaminace a analýza zbytkového zamoření

Kontaminované vzorky byly bezprostředně po uplynutí inkubační doby přeskládány na pracovní plato, vloženy do pracovní komory APPC-NTP prototypu a v obslužném softwaru byl spuštěn proces dekontaminace. Všechny vzorky byly měřeny ve třech opakováních. Při použití 4 různých zkušebních povrchů to znamená, že na každou BCHL připadalo 12 vzorků. Všech těchto 12 vzorků bylo vyskládáno a dekontaminováno zároveň, tak aby nebyly navzájem v kontaktu (obrázek 2).



Obrázek 2: Pracovní plato s vyskládanými kontaminovanými vzorky před vložením do pracovní komory APPC-NTP prototypu.

Totožným způsobem byly připraveny kontrolní vzorky, které byly za stejných podmínek a po stejnou dobu vloženy do testované komory, ale bez zapnutí napěťového zdroje pro generování plazmy.

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

Okamžitě po uběhnutí stanovené doby dekontaminačního procesu (30 min pro HD a 120 min pro ostatní BCHL) byly vzorky zkušebních povrchů s pomocí pinzety přeneseny do váženek a převrstveny 10 ml hexanu tak, aby byly zcela ponořeny. Váženky byly uzavřeny a umístěny na třepačku na 1 minutu. Po jedné minutě byly 1 ml alikvoty přeneseny do 1,5 ml skleněných vialek a označeny jako vzorek A. Vzorky povrchů byly vyjmuty, opláchnuty čistým rozpouštědlem a nechány 1 minutu oschnout. Poté byly přeneseny do čistých váženek, převrstveny dalšími přibližné 10 ml n-hexanu, uzavřeny a umístěny na orbitální třepačku na 90 minut. Poté jsou alikvotní části rozpouštědla přenesena skleněných vialek a označena jako vzorky B. Přesné množství rozpouštědla použitého v obou krocích je zjištěno pomocí analytických vah.

Zbytkové množství BCHL v extraktech bylo zjištěno pomocí GC-FID/FPD metody (Agilent 6890 GC System s kolonou HP-5 30 m o vnitřním průměru 0,32 mm a tloušťkou filmu 0,25 µm). Nalezené množství BCHL v extraktech A i B bylo sečteno. Všechny vzorky jsou vyhotoveny ve třech opakováních a třech pozitivních kontrolách. Nalezené zbytkové množství BCHL je přepočítáno na plošnou hustotu zbytkové kontaminace. Přípustné hodnoty zbytkové kontaminace jsou uvedeny v příslušných aliančních dokumentech (např. AEP-7) a dosažené výsledky mohou být s těmito hodnotami srovnány.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

Všechny experimenty byly prováděny ve třech opakováních, prezentovaná data jsou průměrné hodnoty. Povrchy zkušebních vzorků byly totožným způsobem zamořeny reálnými BCHL o hustotě kontaminace přibližně 10 g/m^2. S ohledem na velikost vzorků byly povrchy zamořeny 4 kapkami čisté BCHL o velikosti 1 µl. Přesná hodnota hustoty kontaminace byla spočítána z hustoty a čistoty použité BCHL. Po hodinové inkubační době byly vzorky přeneseny do pracovní komory APPC-NTP prototypového zařízení a spuštěn dekontaminační proces. Ten trval 30 minut pro HD a 2 hodiny pro ostatní BCHL. Konkrétní podmínky a potřebné doby byly dříve optimalizovány s použitím simulantů. K tomuto času je potřeba připočíst dalších 20-30 minut potřebných pro kondicionování APPC-NTP komory, zejména snížení relativní vlhkosti pod 2% před tím, než bylo možné spustit generování plazmy.

Odmořovací účinnost je určena měřením před a po dekontaminačním zásahu, kde poměr koncentrací přímo indikuje kvalitu dekontaminace. Výsledky mohou být vyjádřeny více způsoby. Často se uvádí v procentech dekontaminační účinnosti:

$$D = \frac{Co - Cz}{Co} x100[\%]$$

Kde D je účinnost dekontaminace v procentech, C_0 je hodnota původní kontaminace, v našem případě pak hodnota kontaminace kontrolního vzorku, Cz je hodnota zbytkové kontaminace po dekontaminaci. Takto vyjádřené hodnoty odmořovací účinnosti jsou užitečné při srovnávacích testech odmořovacích schopností různých prostředků. Aby ovšem mohlo být odmoření považováno za úspěšné je potřeba snížit množství BCHL minimálně na úroveň hodnoty přípustné zbytkové kontaminace. Dosažené výsledky jsou sumarizovány v tab. 1 a na obr. 3.

Pozitivní kontroly byly prováděny striktně za dodržení stejných podmínek a časů jako vlastní vzorky. Hodnoty plošné kontaminace pozitivních kontrol jsou uvedeny v tabulce 1 jako C_0 (g/m^2)

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

a v obrázku 3 jako přirozený úbytek (levá světle modrá část pruhů). Tyto hodnoty reprezentují přirozenou ztrátu BCHL během celého experimentu způsobenou buď odpařením, nebo rozkladem způsobeným vzdušnou vlhkostí, či interakcemi s povrchem. Není překvapením, že ztráty netěkavé látky VX jsou pouze minimální 5-8%, zatímco v případě daleko těkavějšího somanu dochází k odparu 98 % z povrchu neupraveného ocelového plechu i bez použití aktivní dekontaminace plazmou. Vysvětlení zvláštního chování GD a VX na tkaninách pro NBC ochranné prostředky by vyžadovalo hlubší studium. Snížené odpařování GD je pravděpodobně způsobeno sorpcí uvnitř materiálu, který má pravděpodobně jistou degradační aktivitu vůči VX.

Tabulka 1: Průměrné hodnoty zbytkové kontaminace Cz, pozitivní kontroly testovaných povrchů C_0, dekontaminační účinnosti D, a relativní směrodatné odchylky s_r pro jednotlivé povrchy a BCHL. Hodnota počáteční hustoty kontaminace je uvedena pro každou BCHL, inkubační doba byla ve všech případech 60 min.

HD	**Hustota kontaminace:**		12.29 **g.m^{-2}**	
Materiál	**C_Z (µg.cm^{-2})**	**C_0 (g.m^{-2})**	***D (%)***	**s_r (%)**
NBC textílie	**68,15**	9,32	***92,69***	1,61
Butylkaučuk	**207,75**	9,53	***78,20***	1,76
Neupr. ocelový plech	**53,34**	9,36	***94,30***	2,37
USB disk	**38,30**	8,28	***95,37***	0,97

GA	**Hustota kontaminace:**		10.84 **g.m^{-2}**	
Materiál	**C_Z (µg.cm^{-2})**	**C_0 (g.m^{-2})**	***D (%)***	**s_r (%)**
NBC textílie	**17,20**	3,92	***95,61***	1,45
Butylkaučuk	**42,34**	2,92	***85,51***	1,44
Neupr. ocelový plech	**44,93**	3,52	***87,22***	1,20
USB disk	**98,14**	6,18	***84,12***	2,87

GD	**Hustota kontaminace:**		9.96 **g.m^{-2}**	
Materiál	**C_Z (µg.cm^{-2})**	**C_0 (g.m^{-2})**	***D (%)***	**s_r (%)**
NBC textílie	**127,48**	8,43	***84,88***	1,17
Butylkaučuk	**165,45**	3,25	***49,08***	2,77
Neupr. ocelový plech	**9,69**	0,20	***51,63***	9,65
USB disk	**208,14**	4,35	***52,13***	8,57

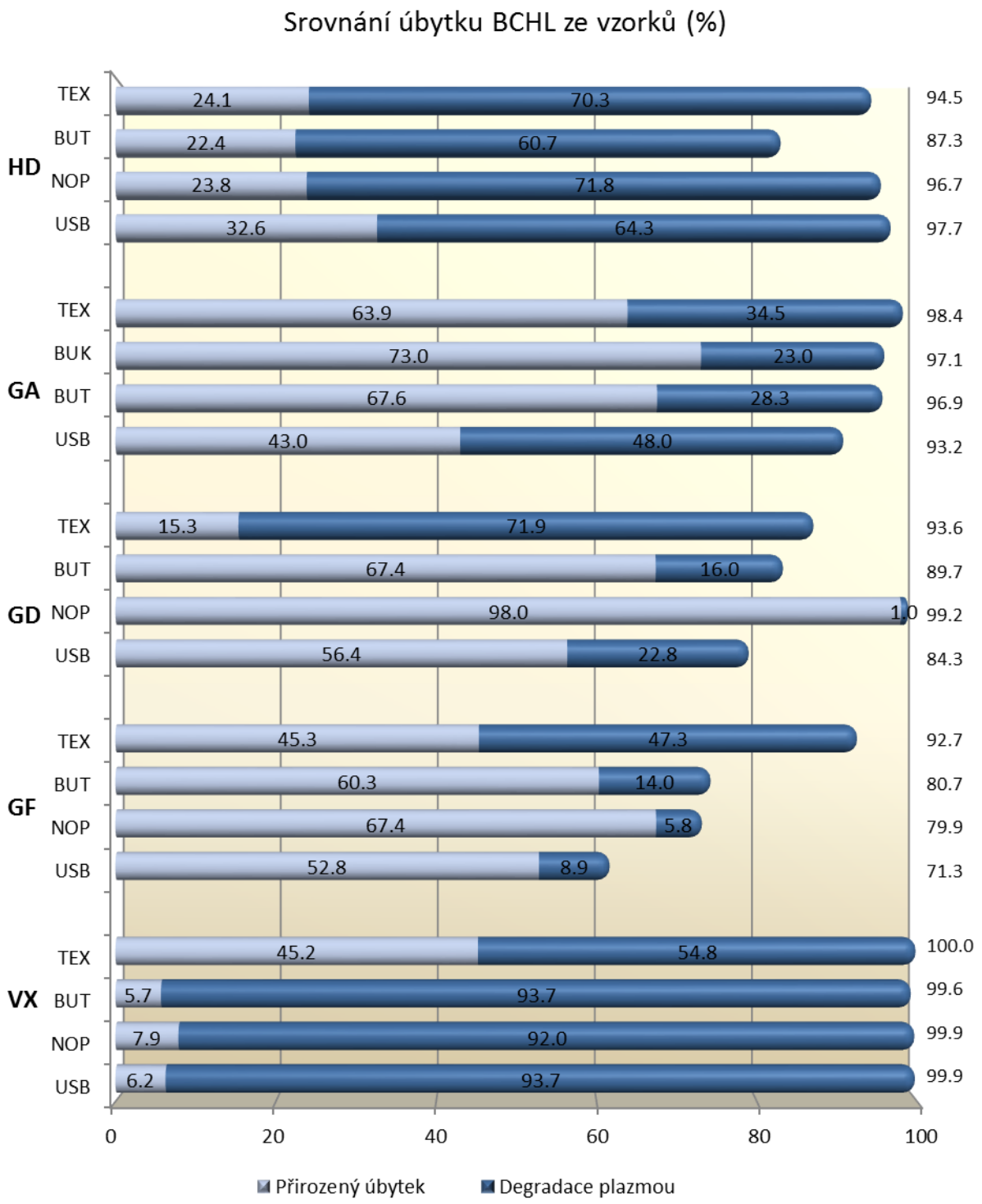
GF	**Hustota kontaminace:**		9.64 **g.m^{-2}**	
Materiál	**C_Z (µg.cm^{-2})**	**C_0 (g.m^{-2})**	***D (%)***	**s_r (%)**

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

NBC textílie	**70,74**	5,27	***86,57***	0,99
Butylkaučuk	**247,47**	3,83	***35,30***	4,41
Neupr. ocelový plech	**257,78**	3,14	***17,84***	7,68
USB disk	**369,19**	4,55	***18,78***	3,86

VX	**Hustota kontaminace:**		8.93 **g.m^{-2}**	
Materiál	**C_Z (µg.cm^{-2})**	**C_0 (g.m^{-2})**	***D (%)***	**s_r (%)**
NBC textílie	**<0,20**	4,89	***>99,96***	0,00
Butylkaučuk	**5,43**	8,42	***99,35***	0,08
Neupr. ocelový plech	**1,48**	8,23	***99,82***	0,09
USB disk	**0,89**	8,37	***99,89***	0,09

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6



Obrázek 3: Grafické znázornění celkového úbytku BCHL (%) ze zkušebních povrchů během celého zkušebního procesu způsobeného jak přirozeným odpařováním (rozkladem), tak aktivním rozkladem plazmou generovanou v pracovní komoře APPC-NTP prototypu.

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

Plošné zbytkového zamoření C_z (µg.cm^{-2}) jsou zbytková množství BCHL extrahovaných ze zkušebních povrchů po dekontaminaci plazmou. V obrázku 3 tyto hodnoty představují celé pruhy. Odečtení přirozeného úbytku nám umožňuje získat představu, jaký podíl na snížení množství BCHL na zkušebních vzorcích je aktivně způsoben plazmou v testovaném prototypovém zařízení (pravá tmavě modrá část pruhů).

Dosažené výsledky ukazují, že testované APPC-NTP zařízení velice dobře dekontaminuje povrchy zamořené látkou VX, kde je pomocí studené plazmy odmořeno více než 90 % původního množství BCHL použitého na kontaminaci. Látky GA, GD a GF jsou méně citlivé na dekontaminaci plazmou s pouze 20-30 % odmořeného množství. V případě HD bylo dosaženo rozkladu 65-70 %. Vyšší dekontaminační účinnosti získané pro látku VX mohou být vysvětleny odlišnými fyzikálními vlastnostmi a chováním na povrchu kontaminovaných vzorků. Kapky látky VX se velmi dobře rozpíjí po povrchu, kde vytvoří velmi tenký film dobře přístupný pro aktivní složky plazmy, zatímco ostatní BCHL zůstávají ve formě dobře definovaných kapek s relativně malým povrchem. V případě použití měkké citlivé dekontaminace plazmou tak zůstává většina BCHL uvnitř kapek chráněna vrstvou degradačních produktů vytvořených na povrchu nepřístupna reaktivním složkám plazmy a další rozklad se zastavuje.

Na základě aliančních dokumentů [4,5] je možné odhadnout prahovou zbytkovou kontaminaci, pod kterou může být povrch považován za bezpečný. Přijatelné riziko zbytkového zamoření je ≤ 60 µg/cm^2 u HD a ≤12 µg/cm^2 u VX a ostatních nervově paralytických látek. Buňky v tabulce 1 zvýrazněné zeleně označují ty hodnoty, které jsou pod prahovou hodnotou a dekontaminační účinek plazmy je tak pro danou kombinaci BCHL a materiálu povrchu dostačující. Je vidět, že testované APPC-NTP zařízení je za použitých podmínek schopné spolehlivě odmořit pouze povrchy zamořené látkou VX. V případě HD byly v dostatečné míře odmořeny povrchy ocelového plechu a USB disku. Hodnoty pro NBC textilii se blížili k hraniční hodnotě, zatímco limitní hodnoty v butylkaučuky byly překročeny 2-3 krát. Penetrace HD do butylkaučukového materiálu je vyšší a molekuly BCHL skryté uvnitř materiálu jsou chráněny před účinky plazmy. Naproti tomu se ukázalo, že vyvinuté zařízení je za testovaných podmínek nevhodné pro dekontaminaci G látek. Limitní přípustné hodnoty zbytkového zamoření bylo dosaženo jen v případě somanu na povrchu ocelového plechu. Nicméně této hodnoty bylo dosaženo i pouhým přirozeným odvětráním bez použití plazmy. Ve všech ostatních případech byly limitní hodnoty výrazně překročeny a na pokles množství BCHL na povrchu mělo větší vliv přirozené odvětrání než aktivní dekontaminace plazmou.

Maximální doporučený čas pro provedení dekontaminace se v aliančních dokumentech [4,5] uvádí jako 30 minut, v žádném případě by neměl překročit 75 minut. Kompletní proces dekontaminace V a G látek včetně 30 minut potřebných pro kondicionaci APPC-NTP komory pak vyžadoval 150 minut. Pouze v případě dekontaminace HD je potřebných 50-60 minut v rámci doporučeného limitu. Plazma nezpůsobila žádné znatelné poškození dekontaminovaných povrchů. Všechny USB disky byly po procesu dekontaminace plazmou úspěšně otestovány bez negativních vlivů na elektronické součásti nebo uložená data. Pouze v případě neupravených ocelových plechů byly pozorovány jemné změny v barvy povrchu.

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6

4. ZÁVĚR

Vyrobený prototyp APPC-NTP zařízení pro dekontaminaci nízkoteplotní plazmou za atmosférického tlaku byl testován v laboratořích Vojenského výzkumného ústavu, s. p. s použitím pěti různých BCHL na čtyřech typech povrchů. Uspořádání experimentů umožnilo srovnat účinek plazmy s přirozeným odparem/rozkladem v průběhu celého procesu dekontaminace. Dosažené výsledky ukazují, že plazma je za daných podmínek velice účinná při dekontaminaci povrchů zamořených látkou VX, kdy bylo dosaženo dekontaminační účinnosti více než 99 % a hodnoty zbytkového zamoření byly ve všech případech pod doporučenými limitními hodnotami. Dekontaminační účinnost při dekontaminaci povrchů kontaminovaných sulfidickým yperitem se pohybuje v rozmezí 78 % v případě butylkaučuku až po 95 % v případě ocelového plechu, či elektronických součástek.

Testy bohužel ukázaly, že daná konstrukce je za použitých podmínek nevhodná pro dekontaminaci povrchů zamořených G látkami, kde dekontaminační účinnost variuje mezi 18 % u GF na ocelovém plechu až po 87 % u GA na stejném povrchu. Výsledky pro NBC textilii jsou zjevně ovlivněny jistou aktivitou výplně tohoto materiálu. Prahová úroveň byla dosažena pouze v případě GD na ocelovém plechu, ale tohoto výsledku bylo dosaženo i prostým odpařováním bez zapojení plazmy. Také čas potřebný k provedení dekontaminace přesahuje doporučené časy.

Výsledky naznačují, že přestože plazma prokazatelně rozkládá BCHL, její aktivní složky nedokáží penetrovat do hloubky materiálu, či dovnitř kapiček BCHL. Pro případné zvýšení účinnosti je potřeba značně upravit uspořádání procedury. Testy zároveň potvrdily, že nízkoteplotní plazma je velice citlivé médium, žádný testovaný povrch nevykazoval známky poškození a také všechny USB disky byly po proceduře plně funkční a bez ztráty dat.

Poděkování

Výzkum byl podpořen Evropskou obranou agenturou projektem č. A-1152-RT-GP431.

Použitá literatura

[1] MISRA NN.; SCHLÜTER O.; CULLEN PJ.: *Cold Plasma in Food and Agriculture, Fundamentals and Applications.* Londýn: Academic Press, 2016. 363 s. ISBN 978-0-12-801365-6.

[2] HERMANN HW.; HENINS I.; PARK J.; SELWYN GS.: Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ). *Physics of Plasmas*. 1999, **6**(5) 228-2289.

[3] MOELLER TM.; ALEXANDER ML.; ENGELHARD MH.; GASPAR DJ.; LUNA ML.; IRVING PM.: Surface decontamination of simulated chemical warfare agents using a nonequilibrium plasma with off-gas monitoring. *IEEE Trans Plasma Sci.* 2000, **30**(1), 1454-1459.

[4] ČOS 681001, Dekontaminační látky a směsi, Praha 2007.

[5] AEP-7, Chemical, Biological, Radiological And Nuclear (Cbrn) Contamination Survivability Factors In The Design, Testing And Acceptance Of Military Equipment, Ed. 5, 2012.

[6] STANAG 4653 – AEP 58 Ed. 1, Combined Operation Characteristics, Technical Specification and Test Procedures and Evaluation Criteria for NBC Decontamination Equipment (Decontamination Triptych), 2012.

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic
http://hazmat-protect.sujchbo.cz
ISBN 978-80-270-4852-6