

Detektory výbušnin

Explosives detectors

Josef Kroča

Bakalářská práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav elektrotechniky a měření
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef KROČA**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Detekce výbušnin**

Zásady pro vypracování:

1. Specifikujte problematiku detekce výbušnin.
2. Popište jednotlivé metody detekce výbušnin.
3. Charakterizujte používané detektory výbušnin.
4. Specifikujte nejnovější trendy v oblasti detekce výbušnin.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Tureček, J. a kol. : **Policejní technika. 1. vydání. Plzeň : Aleš Čeněk 2008.**
2. Tureček, J.: **Technické prostředky bezpečnostních služeb II : detektory pro bezpečnostní prohlídku osob, zavazadel a zásilek. 1. vydání. Praha : PA ČR 2003.**
3. Brebera, S. : **Vojenské trhaviný a technologie výroby trhavinových náloží. 2. vydání. Pardubice : Univerzita Pardubice 2005.**
4. Brebera, S. : **Vojenské trhaviný II. 1. vydání. Pardubice : Univerzita Pardubice 2002.**
5. Tallo, A. a kol.: **Technické systémy a prostriedky polície. 1. vydání. Bratislava, Akadémia Policajného zboru, 2000.**

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Luděk Lukáš, CSc.

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

20. února 2009

Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 20. února 2009

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce bude řešit problematiku hodnocení současného stavu v oblasti detekce výbušnin. Důraz bude položen na osvětlení principu činnosti jednotlivých principů činnosti, typů zařízení a systémů. Hodnoceny budou jednotlivé možnosti použití a schopnosti pro typové situace. Závěr práce bude tvořit specifikace trendů v předmětné oblasti.

Klíčová slova: detekce výbušnin, detektory výbušniny.

ABSTRACT

Bachelor's thesis will deal with the issue of evaluation of the current state in the detection of explosives. Emphasis will be placed on explanation of the rationale behind individual methods, device types and systems. Use options and abilities in type situations will be evaluated. Thesis' conclusion will consist of specifications of trends in the subject area.

Keywords: explosives detection, explosives detectors.

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Ludřkovi Lukášovi, Csc. za odborné vedení, podnětné rady, informace a připomínky, které mi poskytoval během zpracovávání bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
1 SPECIFIKACE PROBLÉMŮ PŘI DETEKCI VYBUŠNIN	11
1.1 TRHAVINY RŮZNÉ KONZISTENCE	11
1.1.1 Trhaviny kapalně konzistence	12
1.1.2 Trhaviny pastovité konzistence	13
1.1.3 Trhaviny plastické konzistence	13
2 METODY DETEKCE VÝBUŠNIN	16
2.1 RENTGENOVÁ DETEKCE.....	16
2.1.1 Princip a vznik rentgenového záření	16
2.1.2 Spektrum rentgenových paprsků	17
Brzdě (spojité) záření	18
Charakteristické záření.....	19
Comptonův rozptyl	20
2.1.3 Bezpečnostní užití rentgenů	21
Rentgeny I. generace	21
Rentgeny II. generace.....	21
Rentgeny III. a IV. generace.....	22
2.2 DETEKCE ELEKTRONOVÉHO ZÁCHYTU (ECD)	23
2.2.1 Předselekcce polopropustnou membránou.....	24
2.2.2 Předkoncentrace absorbcí na speciálním povrchu (s následnou tepelnou desorpcí)	25
2.3 PLYNOVÁ CHROMATOGRFIE (GAS CHROMATOGRAPHY - GC).....	25
2.4 SPEKTROMETRICKÉ METODY	26
2.4.1 Spektrometrie pohyblivosti iontů (IMS – Ion Mobility Spectrometry).....	27
Miniaturní spektrometrie pohyblivosti iontů	27
Solid Phase Microextraction (SPME).....	28
2.4.2 Hmotnostní spektrometrie	28
2.5 JADERNÁ KVADRUPÓLOVÁ REZONANCE (QUADRUPOLE RESONANCE - QR)	29
2.5.1 Jaderná magnetická rezonance	30
2.5.2 Jaderná kvadrupólová rezonance	30
2.6 POLAROGRAFIE (VOLTAMETRIE)	31
2.6.1 Diferenční pulsní voltametrie (Square Wave Voltammetry - SWV)	33
2.6.2 Elektrochemická rozpouštěcí analýza (stripping analysis).....	34
2.6.3 Plyno-polarografická detekce (Gas-phase voltammetric detection).....	34
2.7 PROMPTNÍ NEUTRONOVÁ AKTIVAČNÍ ANALÝZA (PROMPT GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS - PGNA).....	35
2.8 ANALÝZA TERAHERTZOVÝCH VLN (RAMANOVO SPEKTRUM)	36
2.9 KAPILÁRNÍ ELEKTROFORÉZA (CAPILLARY ELECTROPHORESIS - CE)	36
POUŽÍVANÉ DETEKTORY VÝBUŠNIN	38

2.10	RUČNÍ DETEKTORY	38
2.10.1	Detektory částic a par výbušnin	38
	EST – 4200 Ultimate Vapor Tracer	39
	Detektory pracující s Ramanovou spektrometrií	39
2.11	STATICKÉ, RÁMOVÉ A PŘENOSNÉ DETEKTORY	42
2.11.1	Detektor částic par a výbušnin	42
2.11.2	Rentgenové detektory	43
	<i>Obr. 18. Příklad zobrazení zavazadla po průchodu rentgenovým detektorem</i>	<i>44</i>
2.11.3	Kamerová pozorování	45
3	TRENDY MEZI DETEKTORY VÝBUŠNIN	47
ZÁVĚR	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ		51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		54
SEZNAM OBRÁZKŮ		55
SEZNAM TABULEK		56

ÚVOD

Výbušniny mohou sloužit k ušlechtilým cílům, ale taky mohou brát životy. Na světě existuje opravdu široká škála výbušných látek tuhých, kapalných a plyných skupenství, které jsou využívány především k demolicím nežádoucích budov a objektů. Dále v těžebním průmyslu hornin, ropy a vůbec všude kde je potřeba hloubkového výkopu nebo odstřelu nežádoucího strukturálního uspořádání prostředí. Jsou využívány k odminovávání minových polí po poválečných konfliktech. Trhaviny využívají vojenské útvary po celém světě v každodenní rutině náročných bojových misí, nebo cvičení. Také zde jsou využívány různé modifikace náloží k odminovávání polí, odstřelování neprostupných porostů v džunglích, odstřelování zámků dveří a vůbec celkové utváření alternativních postupů do objektů.

Z těchto požadavků pak plyne jasná potřeba výroby trhavin. Po celém světě existuje celá řada firem zabývajících se výrobou výbušnin a následně jejich distribucí do světa. A protože výbušniny jsou na světě již poměrně dlouhou dobu, tak si našly své uplatnění i mezi teroristickými uskupeními.

V dnešním světě je mnoho skupin, které jsou označovány jako teroristické organizace. Terorismus je metoda zavražďování politických odpůrců hrozbou a užitím násilí. Tyto organizace jsou takto označovány, protože se nebojí užít jakéhokoliv násilí vůči lidem, vládním i civilním institucím. Jedná se o pumové útoky, únosy, atentáty, nebo veřejné popravy. Jejich smyslem je vytvoření externího kritického nátlaku na jednotlivce i skupiny. Právě proto jsou výbušniny v jakékoliv podobě velmi rizikovým prvkem v rukou těchto teroristických organizací. Tato globální teroristická, mnohdy i fanatická válka teroristických organizací se může dostat do tak kritického stádia, kdy se bude člověk muset obávat vůbec vyjít mezi lidi, do obchodu na nákup a podobně. Celosvětově vládne obava z dalšího nečekaného bombového útoku.

Jako jedno z efektivních protiopatření takových krizových stavů se jeví značkování průmyslově vyráběných výbušnin a jejich přísná kontrola distribuce. Toto značení je povinné pro státy, které úmluvu podepsaly, od roku 1998. A právě proto, že ještě nyní při psaní této práce existují státy, které odmítají podepsat úmluvu o značkování. Také se nikdo nemůže stoprocentně zaručit tím, že se výbušniny budou značit.

Pro výbušniny vyrobené „podomácku“, nebo výbušniny různými způsoby zakamuflované proti detekčním principům značkovacích látek, jsou velmi podstatným bezpečnostním opatřením právě detektory výbušnin, vhodně umístěné na místech s vysokou koncentrací pohybujících se osob jako jsou například letiště, uvnitř i ve venkovních prostranstvích, vládní budovy, jaderné elektrárny, vlaková a podzemní nádraží. Teroristé používají stále promyšlenější způsoby umístování a detonací bomb, jako například:

- sebevražední atentátníci (oblečení do upravených vest nesoucích výbušniny, popřípadě i upravené boty jako IED – improvised explosive device),
- automobilové a nákladní bomby umístované v dodávkách a autech před vládními budovami,
- takzvané pipe bomby, podomácku vyráběné výbušniny z lehce dostupných složek, jejichž výbuch je umocněn umístěním v ocelové trubce (IED).

Takových improvizovaných výbušných zařízení je celá řada, záleží jen na vynalézavosti útočníka.

V posledních letech se teroristickým skupinám „daří“ vytvářet v různých státech Evropy jejich takzvané operační buňky. Tyto buňky představují asi největší riziko ke zneužití výbušnin. Navíc výbušniny pro vojenské účely se neznačí, a ani si nemůžeme být jisti, jaké množství výbušnin je v oběhu ještě z dob před povinným začátkem jejich značení. A také dnešní systémy pro detekci výbušnin, v některých případech nedosahují potřebných vlastností k odhalování bezprostředního nebezpečí. Novější, citlivější přístroje, pracující s různými fyzikálními, elektrochemickými, elektrickými principy a jejich kombinacemi, se stále zkoumají a zdokonalují. Detektory výbušnin jsou velmi citlivé přístroje, vyhodnocující částičky výbušnin o velikostech mikronů, takže takové technologie jsou také poměrně nákladné. Proto není finančně možné, abychom měli takové automatické detektory rozmístěny po ulicích, připraveny tak s ještě větší efektivností nás varovat před případným bombovým útokem. Detektory výbušnin jsou nepostradatelné také pro detekci značených výbušnin, protože nikdo se opět nemůže zaručit zda se nedostanou výbušniny do nežádoucích rukou.

1 SPECIFIKACE PROBLÉMŮ PŘI DETEKCI VYBUŠNIN

„Trhaviny jsou výbušniny, jejichž hlavním a prakticky využívaným typem výbušné přeměny je detonace.“[1] Pro ochranu života a majetku je detonace krajním nežádoucím jevem. Proto při preventivní ochraně nám jde především o včasnou detekci ukryvané výbušniny ve střežených prostorech. Pro lepší pochopení problémů detekce trhavin by bylo vhodné seznámit se s tím, jakých vlastností lze u výbušnin dosáhnout. „Výbušniny na základě jejich chemických, fyzikálních a výbušninářských vlastností můžeme třídít podle různých hledisek“[2], které pak v konečném důsledku vytváří výbušninu obtížněji detekovatelnou. V některých případech, je pak tato „detekovatelnost“ tak snížena, že se výbušnina jeví jako nedetekovatelná v efektivním smyslu pro zabezpečovací potřeby.

Podle složení se výbušniny dělí na:

- chemicky jednotné výbušniny, v praxi ne moc účinné jelikož jsou omezené nevyužitím kombinací příměsí dalších výbušných prvků a zlepšení tak výbušných vlastností,
- vícesložkové výbušniny mezi které patří všechny průmyslové výbušniny i naprostá většina vojenských výbušnin.

A podle skupenského stavu se dělí na:

- výbušné systémy plynné,
- výbušniny kondenzované tj. kapalné a pevné, kondenzované výbušniny tedy zahrnují širokou oblast látek od skupenství skutečně kapalného až po skupenství výrazně pevné, tedy látek, které se mezi sebou liší různými tokovými vlastnostmi a deformačním chováním, které vystihujeme pojmem konzistence.

1.1 Trhaviny různé konzistence

U takto vytvořených výbušnin vznikají problémy v jejich detekci právě díky tomu, že je může případný útočník libovolně tvarovat, do tenkých pláštvi (je však do jisté míry omezeno typem výbušnin), nebo je ukrývat v takové formě, která je obtížně odhalitelná detektorem, popřípadě je tak umísťovat do tělních dutin. Trhaviny různé konzistence rozdělujeme na:

- kapalné,

- pastovité,
- plastické.

1.1.1 Trhaviny kapalné konzistence

Výbušné slože kapalné konzistence představují značné riziko kvůli jejich poměrně snadné připravenosti. Jedná se především o druhy peroxidů, které mají velmi brisantní a explosivní sílu. U kapalných trhavin jsou nejdůležitější skupinou kapalné dusičné estery vícemocných alkoholů a z nich pak nitroglycerin (NG), nitroglykol (EGDN), dyethylenglykoldinitrát (DEDGN) a jiné (existuje opravdu značné množství kapalných výbušných sloučenin).

Kapalné výbušniny samy o sobě, díky poměrně velké těkavosti, nepředstavují problém pro odhalení detektory par, nebo částec. Nicméně, výpary výbušniny se musí dostat k detekčnímu prvku detektoru, aby bylo možno takovou výbušnou složku odhalit. Existují totiž materiály, kterými se dá zabránit pronikání výparů do prostředí. Navíc jistými sofistikovanými postupy se dá také zamezit tomu, že detektory částec zaznamenají výbušninu. Dnešní rentgenové detektory většinou dokáží upozornit, že ve zkoumaném objektu se nachází kapalina, ale nedokáží určit zda jde o výbušninu. „Milivizní“ technologie tady taky padá. Největší hrozbu pak představují například dvě PET láhve s takovými složkami, které jsou schopny detonovat až po jejich smíchání. Jedná se o **směsné kapalné výbušniny**. Detektory takovéto složky nedetekují, jelikož odděleně se jedná o okysličovadlo a palivo.

Detektory pracující s terahertzovými vlnami mají potenciál k tomu být schopné detekovat kapalné trhaviny s velkou přesností a selektivností, to ale závisí hlavně na technologické propracovanosti a citlivosti detektoru. Jejich nevýhoda při detekci skrytých výbušnin pod oděvem je ale v tom, že je už potřeba silnějšího zdroje záření, který může poškodit lidský zrak. Detektor kvadrupólové rezonance by měl být také schopen splňovat požadované parametry pro zjištění, zda se v zájmovém prostoru nachází výbušnina, bavíme-li se o kapalných trhavinách. Quadrupólová rezonance je však schopná detekovat i plastické trhaviny. *Navíc může být definována unikátní nukleární magnetická rezonance pro různé kapaliny*, avšak tyto technologie se stále vyvíjejí. Quadrupólová rezonance zatím nachází uplatnění u detektorů nášlapných min, jakožto prvek zlepšující selektivnost detektoru (snížení falešných poplachů).

Celkově se mi jeví současný stav v oblasti detektorů kapalných výbušnin jako nedostatečný, důkazem tomu jsou i nedávné „úspěšné“ bombové útoky v Madridu a Londýně, které byly provedeny právě těmito výbušnými směsmi. Tento problém existuje hlavně kvůli stále ještě neúplným provedením zkoumaných fyzikálních principů, a jejich vývojem.

1.1.2 Trhaviny pastovité konzistence

„Pasta je soustava složená ze spojitého disperzního prostředí ve kterém jsou rozptýleny drobné částice tj. disperzní podíl, který obecně zaujímá více než 10 obj. % celkového objemu soustavy.“ [2] V praxi taková trhavina může mít konzistenci jako zubní pasta. Pastovité trhaviny nacházejí uplatnění jako řezací trhaviny, přídatné nálož, náplně do vojenských min a k odminovávání polí, apod. Trhaviny pastovité konzistence podle [2]: *„obvykle jsou založeny na kapalných mononitro-alkánech nebo dusičných esterech jednomocných alifatických alkoholů a jako ztužovadlo se používá jemný oxid křemičitý.“* [2]

U pastovitých trhavin zaujímá disperzní podíl, tj. částice brisantní výbušniny, případně dalších pevných složek 30 - 75 obj. % z celkového objemu směsné trhaviny. V podstatě se jedná o výbušniny, pohybující se svojí konzistencí mezi kapalnými a plastickými trhavinami. Takže vlastnosti, ovlivňující jejich detekci, jsou vesměs společné.

1.1.3 Trhaviny plastické konzistence

Bývají většinou složeny z brisantní krystalické výbušniny (např. pentrit, hexogen), případně dalších práškových přísad modifikujících jejich výbušninářské vlastnosti a plastického pojiva, můžeme z fyzikálního hlediska považovat za pasty. Na rozdíl od pastovitých trhavin je v plastických výbušninách objemová koncentrace pevných částic brisantní výbušniny vyšší než u pastovitých trhavin (nad 75 obj. %).

Plastické trhaviny jsou známé po celém světě, asi nejznámějším českým výrobkem v této oblasti je trhavina semtex a jeho „odrůdy“. Závažnou vlastností, typickou pro plastické výbušniny, je jejich nízká tenze par výbušných ingrediencí. V následující tabulce jsou uvedeny tenze par v teplotním rozmezí 0 až 30°C. Jen uvedu, že RDX značí hexogen a PETN pentrit. AN je pak dusičnan amonný. Ten se většinou ani neuvádí, že jej detektor je schopen rozpoznat, jinak bývá uveden do skupiny „jiné“ výbušniny, které by určený

detektor měl být schopen detekovat, ale s jistotou to nevíme. Obdobně je tomu i u více improvizovaně vyráběných trhavin. Přitom se jedná o většinou snadno dostupné a účinné trhavy.

Tab. 1. Závislost tenze par na teplotě

Tenze par	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C
RDX (ppt)	0,06	0,43	2,57	6,03	14,45
PETN (ppt)	0,11	0,93	6,92	18,20	45,71
TNT (ppb)	0,19	1,00	4,57	9,55	19,05
NG (ppb)	22,39	89,12	316,2	588,8	1047,1
AN (ppb)	1,00	2,88	7,35	12,30	19,05

Jak můžeme vidět z tabulky 1 (jsou uvedeny i trhavy NG a AN pro porovnání výparů), tak se jedná opravdu o nízké hodnoty, navíc ovlivněné teplotou. Právě nižší teploty znesnadňují jejich detekování, až na nolovou úroveň. Dnešní detektory par a částic výbušnin jsou již tak citlivé, že dokáží detekovat jedinou částičku výbušnin, která se pohybuje v rozměrech, v průměru 30 mikronů a váží 40 ng. Tyto malé částičky výbušnin se také označují jako fingerprints (otisky prstů) a pohybují se volně vzduchem tam kde se jakkoliv nakládá s výbušninami, zůstávají zachycené v oděvu, na pokožce člověka atd. A právě proto, že se pohybují volně prostředím, nemůžeme jednoznačně určit, že se jedná o teroristu, nebo člověka majícího u sebe aktuálně výbušninu. Na druhou stranu je to upozornění že v blízkosti se může skutečně nacházet výbušnina. Tento způsob detekce se dá však také vhodnou manipulací a technikama oklamat.

Proto mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) přijala "Úmluvu o označování plastických výbušnin pro detekční účely" v roce 1991 (ratifikována v roce 1998), která vyžaduje doplnění některých značkových látek, které mají dostatečnou tenzi par, aby při smíchání s výbušnin, umožňovala jejich detekci. Úmluva nařídila státům kontrolu nad neoznačenými, nespotebovanými výbušninami, popřípadě jejich likvidaci, nebo urychlené spotřebování. Dnešní kombinace technologií již dokáží velmi dobře detekovat a vyhodnocovat tyto detekční příměsi, za přijatelnou dobu expozice (řádově 1 –

30 sekund). Tato přídatná látka, například 2,3-dimethyl-2,3-dinitrobutan (DMNB) vůbec neovlivňuje jakoukoliv vlastnost výbušniny.

Ovšem díky dřívější produkci neoznačkových výbušnin se dá předpokládat, že jsou tyto výbušniny stále v oběhu. Nikdo navíc nemůže s jistotou říct, zda se neoznačované výbušniny nebudou nadále tajně vyrábět. Navíc ještě i teď při psaní této práce jsou státy, které tuto úmluvu nepodepsaly.

Dále rentgenové detektory, pokud se nejedná o rentgeny s počítačovou tomografií, nemusejí zaznamenat dobře ukrytou plástev výbušniny. Výbušniny mají každá svůj kritický průměr, to znamená, že pokud bude výbušnina roztažena do placky pod tímto průměrem, tak nebude možno ji iniciovat. Tyto průměry se však pohybují v řádech milimetrů, podle typu výbušniny. Pokud mluvíme o rentgenových pásových detektorech, jenž vyhodnocují protonové číslo a hustotu objektu, musíme brát stále v potaz to, že hustota plastické trhaviny už samotným modelováním se mění, a taky je spousta látek, především organického původu, které mají průměrné protonové číslo a hustotu shodnou s některými výbušninami. Proto se budou při kontrole zavazadel a přepravních objektů vyskytovat v určitém procentu falešné poplachy.

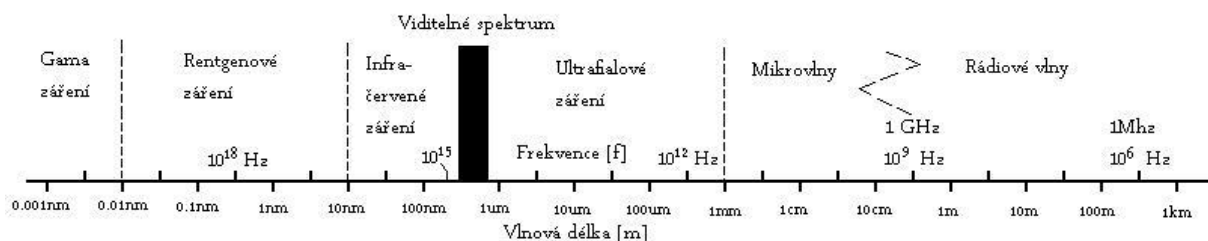
2 METODY DETEKCE VÝBUŠNIN

Díky znalostem složení a chování trhavých směsí, můžeme vhodnými fyzikálními, chemickými a fyzikálně-chemickými metodami tyto výbušniny detekovat. Pro potřeby detekování trhavin existuje množství detekčních technologií. V následujících bodech rozeberu jednotlivé fyzikální principy těchto metod.

2.1 Rentgenová detekce

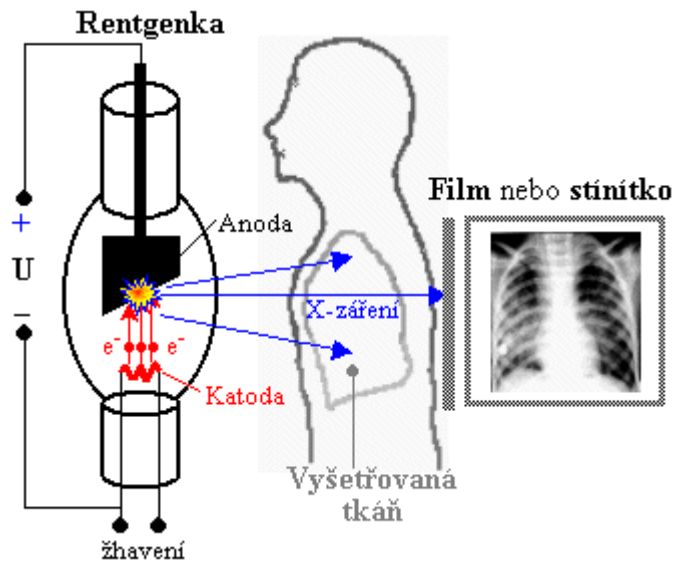
Už od roku 1896 kdy byl zhotoven první rentgenový snímek ruky se výzkum rentgenových detektorů stále zdokonaloval až do dnešní podoby.

2.1.1 Princip a vznik rentgenového záření



Obr. 1. Elektromagnetické spektrum

Jak je vidět z obrázku 1, je rentgenové záření definováno elektromagnetickým vlněním s velmi krátkou vlnovou délkou λ (0,01 až 10nm), která je více než tisíckrát kratší než vlnová délka viditelného světla, nebo frekvencí f (30 PHz až 60 EHz). Tato záření vznikají prudkým zabrzděním rychlého toku elektronů na hmotné překážce. Jejich primárním zdrojem je obvykle elektronka, nazývaná rentgenka. Z rozžhavené záporné katody vyletují elektrony směrem ke kladné anodě. Mezi katodou a anodou je připojeno vysoké napětí o velikosti desítek tisíců voltů, které uděluje elektronům vysokou rychlost. Při dopadu elektronů na anodu se většina jejich kinetické energie mění v teplo. Část energie dopadajících elektronů se mění na energii rentgenového záření, které vystupuje z anody. Rentgenové záření ionizuje vzduch, vyvolává světélkování některých látek, způsobuje zčernání fotografického filmu a působí také na živé organismy. Záření prochází různými látkami, ale je jimi více nebo méně pohlcováno.



Obr. 2. Vznik rentgenového záření

Rentgenové záření je vlastně tok fotonů šířících se rychlostí světla, pak platí že jejich energie je:

$$E = h \cdot f$$

h - Planckova konstanta (přibližně $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)

a frekvenci vyjádříme jako:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

c - rychlost světla ($3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Nakonec pak můžeme vyjádřit intenzitu rentgenového záření jako:

$$\int I(\lambda) d\lambda$$

I - intenzita rentgenového záření

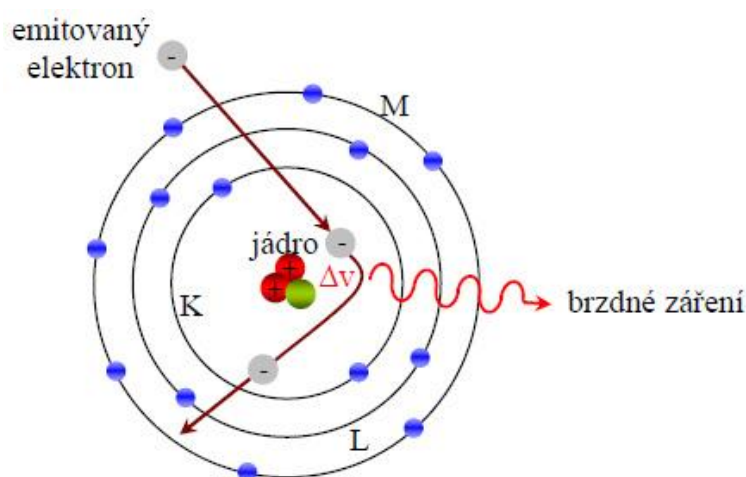
2.1.2 Spektrum rentgenových paprsků

Při dopadu elektronů na anodu dochází k interakci urychlených fotonů s materiálem anody. Tato akce dělí vyzařované spektrum rentgenového paprsku na dvě složky:

- brzdné (spojité) záření,
- charakteristické záření.

Brzdné (spojité) záření

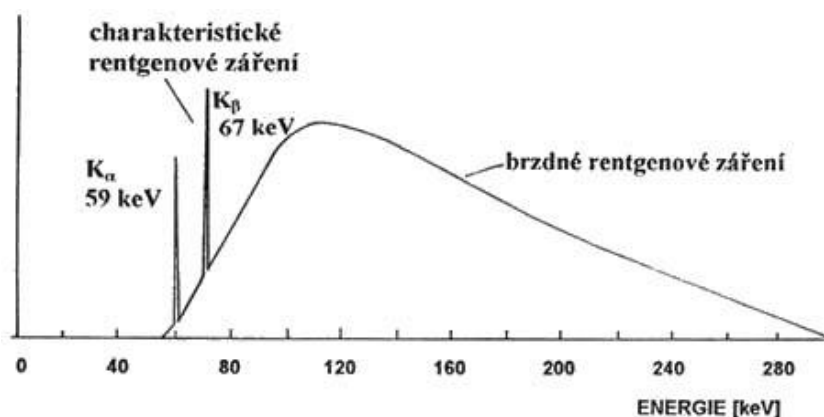
Při dopadu urychlených elektronů na anodu se elektrony zabrzdí a jejich kinetická energie se přemění z části na energii tepelnou, z části na fotony elektromagnetického záření o vysokých frekvencích. Toto elektromagnetické záření se nazývá brzdné rentgenové záření. Brzdné rentgenové záření vzniká při snížení kinetické energie letícího elektronu v blízkosti jádra atomu prvku materiálu, z něhož je anoda tvořena. Jádro atomu je kladně nabitě, přitahuje opačně nabitý letící elektron a mění jeho směr pohybu – vektor rychlosti.



Obr. 3. Princip Brzdného záření [3]

Energie brzdného záření je závislá na kinetické energii letících elektronů. Čím větší rychlost budou urychlené elektrony mít, tím více budou pronikat hlouběji k jádru atomu. Proniknou-li až na hranici slupky K, dojde vlivem velkých elektrických silových vazeb k velice rychlé změně vektoru rychlosti elektronu, přičemž dojde k vyzáření kvanta rentgenového záření o vysoké energii. Naopak proniknou-li elektrony vlivem malé rychlosti pouze k vnějším slupkám atomu, dojde k jejich pomalému zabrzdění a malému vyzáření rentgenového záření. Z toho vyplývá, že čím více urychlené elektrony pronikají do pole atomu, tím více je uvolňováno rentgenového záření o větší intenzitě. Účinnost interakce s polem jádra atomu je poměrně malá, asi 1 – 2 %. Je to způsobeno tím, že opravdu málo urychlených elektronů pronikne hluboko k jádru atomu, kde způsobí brzdné záření. Zbytek elektronů je ztracen termoemisní reakcí, kdy letící elektrony narážejí na ostatní elektrony krystalové mřížky materiálu anody, které kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Protože urychlené elektrony jsou různě brzdněny na energetických

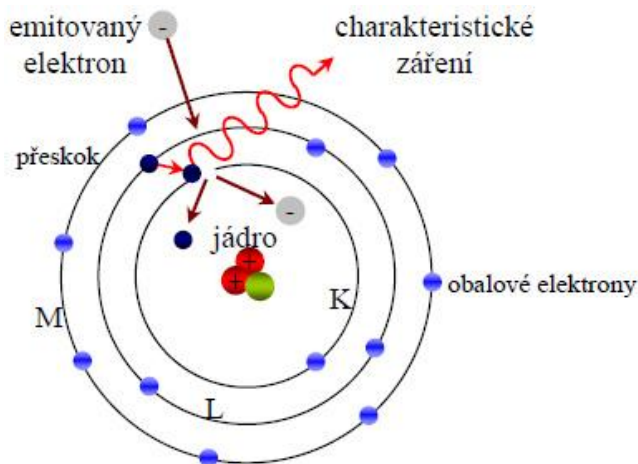
hladinách atomu, dochází ke vzniku vzájemně od sebe odlišných záření dle velikosti jejich vlnových délek. Brzdné záření tvoří spojité spektrum.



Obr. 4. grafické znázornění spektra záření

Charakteristické záření

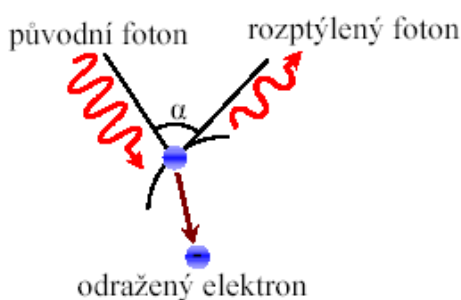
Kromě brzdného záření zároveň vzniká při dopadu na anodu i druhotná forma rentgenového záření. Toto záření je nazýváno jako záření charakteristické. Vzniká na vnitřních energetických hladinách atomů v důsledku přeskoků elektronů ze vzdálenějších slupek, přechodem na nižší energetickou hladinu. Urychlený emitovaný elektron na své dráze narazí na původní elektron ve slupce *K* a vyrazí ho ven ze své vazby. Vznikne díra, která je následně zaplněna elektronem ze vzdálenější slupky *L*. Při tomto elektronovém přeskoku je uvolněno kvantum energie rentgenového záření. Množství uvolněné energie závisí na rozdílu energetických hladin při přeskokách elektronů z vazeb. Charakteristické záření má frekvenci, která pak plyne z rozdílu energie před přeskokem a po přeskoku. Charakteristické záření je vyzařováno narozdíl od brzdného jen v malém množství a ve spojitém spektru rentgenového záření tvoří špičky.



Obr. 5. Princip charakteristického záření [3]

Comptonův rozptyl

Comptonův rozptyl představuje děj, při kterém se rentgenové fotony při dopadu na obalové elektrony atomů látky odrážejí a mění svou vlnovou délku. Při průchodu rentgenového záření o nízké energii (desítky keV) látkou s nízkým protonovým číslem narážejí rentgenové fotony na nízkoenergetické obalové elektrony atomů. Tyto elektrony jsou na vnějších slupkách velice slabě vázány a chovají se téměř jako volné. Při srážce se rentgenový foton odrazí od obalového elektronu pod určitým úhlem, přičemž ztratí určitou část své energie. Velikost tohoto úhlu závisí na velikosti ztracené energie fotonu. Čím více energie srážkou foton ztratí, tím větší bude jeho úhel odrazu.



Obr. 6. Princip Comptonova rozptylu záření [20]

2.1.3 Bezpečnostní užití rentgenů

Dnešní rentgenové detektory výbušnin se nejčastěji používají na letištích a všude tam, kde je potřeba provádět kontrolu zavazadel a balíků různých velikostí, popřípadě pro rentgenování nákladních vozidel.

Rentgeny I. generace

Za rentgeny první generace můžeme považovat ty rentgeny které nedokáží určit druh skenované látky. Jsou to například levnější pásové rentgeny a většina přenosných rentgenů. Rentgeny s dopravníkovým pásem umožňují využití systému skenování, kdy je rentgenovo záření z rentgenky omezeno olověným stíněním ve tvaru svislé podlouhlé štěrbině. Je tak zajištěno skenování ve vodorovném přímočarém směru pohybu zkoumaných objektů. Navíc se tak odstraňují deformace obrazu. A hlavně je tak vyfiltrováno Comptonovo záření z celého tělesa. Stručně řečeno na detekční část dopadá pouze záření prošlé v dané svislé rovině, v daný okamžik.

Rentgeny II. generace

Na rozdíl od rentgenů I. generace, rentgeny II. a III. generace dokáží alespoň orientačně určit druh skenovaných látek. Rentgeny II. generace využívají principu dvojí energie rentgenova záření. Princip spočívá ve využití dvou nízko-energetických rentgenových zářičů, a to každého s jinou vyzařovací energií. V praxi to pak vypadá, že pro látky s nižším protonovým číslem (výbušniny, plasty, drogy, papír) je převládajícím mechanismem Comptonův rozptyl. A pro látky s vyšším protonovým číslem (kovy) bude převládající fotoelektrický jev, a tudíž záření těmito látkami téměř neprojde. Tyto rentgenové detektory se využívají u dnešních moderních pásových rentgenů s využitím dvojnásobného počtu detekčních prvků oproti standardním detektorům. Jednotlivé detekční panely pak díky energetickým filtrům snímají záření daného energetického rozsahu.

Metoda dual energy se však nevyužívá u menších rentgenů kvůli nákladnosti. Jejich barevné displeje (pokud obsahují) pouze přiřazuje barvy odstínům šedi, tzv. pseudobarevné zobrazení. Na rozdíl od pásových klasických rentgenů s dual energy, přiřazují různé barvy látkám podle jejich protonového čísla. Významným nedostatkem těchto systémů je nerozlišitelnost zájmových látek pokud jsou umístěny za jinou položkou. Tak může být výbušnina nesprávně identifikována jako neorganický nebo kovový objekt.

U pásových rentgenů využívajících metody dual energy se také jako doplněk využívá Comptonova rozptylu. A to tak že se na stranu zářiče rentgenových paprsků přidá i detekční panel který zachytává zpětně rozptýlené paprsky, které daleko intenzivněji zobrazují výbušniny, a může tak napomoci ke správnému vyhodnocení, pokud je za výbušninou umístěna kovová destička. Tyto detekční soustavy se umísťují z obou dvou stran pásu, nicméně pokud budeme mít výbušninu umístěnou mezi dvěma, i poměrně tenkými vrstvami kovu, tak se nám výsledně zobrazí pouze kovová destička.

Rentgeny III. a IV. generace

Rentgeny I. a II. generace dokáží rozpoznat pouze dvě různé materiálové kategorie (maximálně tři – organické, anorganické, kovové). Navíc pouze z jednoho směru. To, jak praxe ukazuje, je nedostatečné. Řešení se nabízí v podobě rentgenů III. a vyšších generací, které bývají v automatických systémech vyhodnocování, kde se procentuelně jedná o přibližně 20 % objektů, u kterých musí obsluha rozhodovat. Stále mluvíme o rentgenech s pásovou dopravou.

- **Rentgeny s počítačovou tomografií.**

Bezpečnostní rentgeny s CT (computed tomography) jsou odvozeny z rentgenů pro lékařské účely. Otáčejí se zcela kolem dokola skenovaného objektu a nastřádané obrazy pak počítač zpracuje. Na základě těchto dat můžeme určovat útlum rentgenova záření v jednotlivých pomyslných plošných vrstvách zkoumaného objektu. A tak můžeme odhadovat materiálovou hustotu označovanou jako CT hustota (v kg/m^3). Zájmové výbušniny pak rentgen určuje na základě této CT hustoty (naměřené tabulkové hodnoty).

Tento druh rentgenů dokáže vytvořit i trojrozměrný obraz zkoumaného předmětu s barevným odlišením zájmových materiálů.

- **Rentgeny s dvojitou energií s přídatným kolmým skenováním.**

Tyto rentgeny využívají pořizování rentgenových obrazů objektu metodou dvojí energie ze dvou navzájem kolmých směrů. Skládají se ze dvou rentgenových trubic o stejném napětí. Detekci záření zajišťuje zdvojená soustava detektorů. Takto vytvořená data pak zpracuje počítač, který vytvoří třidimenzionální model organických materiálů a automaticky identifikuje nebezpečné položky.

V případě podezřelého objektu v podobě výbušniny má obsluha k dispozici dva vzájemně kolmé snímky s barevně označenou podezřelou oblastí. Tady bývá pak personální rozhodovací doba běžně 2 až 5 sekund na zavazadlo.

- **Rentgeny s dvojí energií s vícečetní druhovou identifikací.**

Jedná se o způsob založený na počítačovém zpracování dat a vysoce přesném a stabilním zdroji rentgenova záření o dvou různých energiích (nazýváno true dual energy). Ve skutečnosti mají buď dva rentgenové systémy pracující s odlišnými energiemi záření, nebo jeden pulsní zdroj dodávající střídavě dvě různé energie záření. Počítač pak identifikuje nebezpečné položky na základě protonového čísla, velikosti, hustoty, hmotnosti, apod.

Tyto rentgeny se pak vyznačují vícečetní druhovou identifikací. Samy dokáží identifikovat výbušniny, některé bankovky, a barevně je dokáží odlišit od kovů a jiných materiálů (papír, textil, kůže). Prokazují se schopností identifikovat tyto zájmové položky i v přečpaném prostředí nebo značně stíněném jinými položkami.

Existují ještě vylepšené systémy rentgenové detekce s využitím Comptonova zpětného rozptylu. Toto zvyšuje citlivost systému na tenké položky ze zájmových materiálů. Personální rozhodovací doba bývá opět 2 až 5 sekund.

2.2 Detekce elektronového záchytu (ECD)

Detekce elektronového záchytu je dlouho známý fyzikální princip, jehož se využívá u velkého množství detektorů stopových částic (především starší výroby). Podstata činnosti spočívá v předselekcí, nebo předkoncentraci nasávaného vzduchu z okolí kontrolovaného objektu (případně nasávání z filtru, jímž byl předmět otřen). Tento nasátý vzduch, obsahující částice výbušnin, je pak unášen s nosným plynem komůrkou, kde probíhá jeho ionizace. Po ionizaci proudí tato směs mezi dvěma elektrodami, na kterých je stejnosměrné napětí. Pokud obsahuje částičky výbušnin, a jelikož mají vysokou elektronovou afinitu, tak způsobí rychlou absorpci volných elektronů a tím sníží vodivost mezi elektrodami, čili poklesne proud na detektoru.

Nosným plynem se nejčastěji užívá argonu nebo helia. K ionizaci se nejčastěji používá proud beta částic z tabletky radioizotopu. Proud těchto částic se pohybuje v energiích okolo 18 keV, méně než 250 milicurie na zdroj. Namísto toho se někdy používá k ionizaci nosného plynu vysoký gradient elektrického potenciálu utvořený kolem špičky ionizační jehly s vysokým napětím až 4 kV. Hrot jehly je umístěn uprostřed přívodní trubice.

2.2.1 Předselekcce polopropustnou membránou

Polopropustné membrány umožňují přivádět do detektoru organické molekuly, jako jsou molekuly výbušnin, zadržují přitom částice prachu a drasticky omezují například cigaretový kouř, ale i množství hlavních složek vzduchu. Nasávaný vzduch proudí kolem jedné strany polopropustné membrány. Kolem druhé strany membrány proudí nosný plyn, který pak pokračuje dál do vlastního detektoru. Povrchová adsorbce organických molekul na povrchu polymerové polopropustné membrány je daleko vyšší než je tomu například u dusíku či kyslíku (hlavní složky vzduchu). Tyto organické molekuly pak, vzhledem k rozdílným parciálním tlakům na obou koncích membrány, difundují skrz membránu a jsou strhávány nosným plynem do detektoru. Částice prachu skrz membránu, vzhledem ke své velikosti, neprojdou vůbec.

Tyto polopropustné membrány z moderních materiálů s vysoce selektivní povrchovou adsorbci nacházejí uplatnění jako pomocný prostředek předselekcí organických molekul u detektorů na bázi plynové chromatografie, spektrometrie pohyblivosti iontů i hmotnostní spektrometrie.

Konkrétní detektory výbušnin jsou pak na základě těchto poznatků konstruovány například ze sondy o dvou soustředěných trubičkách, kde vnější trubička je opatřena membránovým okénkem. Vnitřní trubička je pak uvnitř za touto membránou a proudí v ní nosný plyn (s případnými částicemi výbušnin) k detektoru. Pokud se u vnějšího povrchu membrány objeví páry výbušnin, tak jelikož budou mít tyto páry rozdílnou - větší koncentraci než nosný plyn - budou tyto páry prostupovat skrz membránu a budou strhávány do detektoru nosným plynem.

2.2.2 Předkoncentrace absorbcí na speciálním povrchu (s následnou tepelnou desorpcí)

Stavba detektoru výbušnin s technologickým principem předkoncentrace absorpce na speciálním povrchu (s následnou tepelnou desorpcí) spočívá opět v nasávání vzduchu s organickými molekulami výbušnin, který proudí po určitou dobu kolem wolframového (platinového) vlákna nebo mřížky. Toto vlákno musí být povrchově upraveno tak, aby vykazovalo vysokou absorpci molekul s nitroskupinami. Na vlákne se naabsorbují tyto molekuly trhavin a následným nažhavením vlákna jsou uvolněny a hnány proudícím nosným plynem do vlastního detektoru.

Tohoto principu se hlavně uplatňuje u plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie, jako pomocného prostředku k předkoncentraci organických molekul.

2.3 Plynová chromatografie (Gas Chromatography - GC)

Plynová chromatografie je separační metoda pro analýzu složení látek, značně rozšířená po celém světě v mnoha různých podobách. Touto metodou může být analyzována většina sloučenin s bodem varu menším než asi 250 °C. Typické doby analýzy u laboratorních přístrojů činí 10 až 30 minut, což je pro bezpečnostní detektory nepřijatelné. U nich se doba analýzy pohybuje v rozmezí zhruba 3 až 30 sekund.

Pro detekci výbušnin se využívá několik podob plynové chromatografie. Vždy je však odebraný vzorkový materiál strháván nosným inertním plynem a spolu s ním vstupuje do vyhřívané separační kolony naplněné sorbentem, kde se směs rozděluje na jednotlivé složky podle jejich charakteristických rychlostí proudění.

Plynovou chromatografii dělíme na:

- chromatografie plyn – pevná fáze,
- chromatografie plyn – kapalina.

Podstatná je pak pro účely detekce trhaviny rychlost proudění jednotlivých složek. Tato rychlost složek závisí na rychlosti proudu nosného plynu a na koeficientu adsorbce těchto složek na povrchu pevného sorbentu. V případě chromatografie plyn – kapalina se jedná o rozpustnost v kapalně fázi.

Široce je však využívána separace pomocí tenké kapiláry o vnitřním průměru 0,1 – 0,5 mm, s nanesenou tenkou vrstvou netěkavé stacionární kapalné fáze na vnitřní straně.

Celkově tak detektory výbušnin vypadají, že mají separační kolonu tvořenou tenkou kapilárou (nebo dvěma – dual GC), kladoucí proudění jistý odpor, různý pro různé složky (selektce). Okamžik vstupu vzorku do kolony je řízen přesným dávkovačem, nebo přesně časově zjištěn. Na vyústění kolony je připojen detektor v podobě elektronového záchyty (ECD) nebo chemiluminiscentní detektor (CL).

V jiném případě můžeme použít plynovou chromatografii pro přípravu vzorku u spektrometru pohyblivosti iontů (GC/IMS) nebo hmotnostního spektrometru (GC/MS), která zvyšuje citlivost a zlepšuje selektivitu pro následnou detekci v detektoru.

2.4 Spektrometrické metody

Spektrometrické metody detekce výbušnin v různé formě (kapalina, plastická nebo pastovitá) vyžadují zpravidla tyto komponenty:

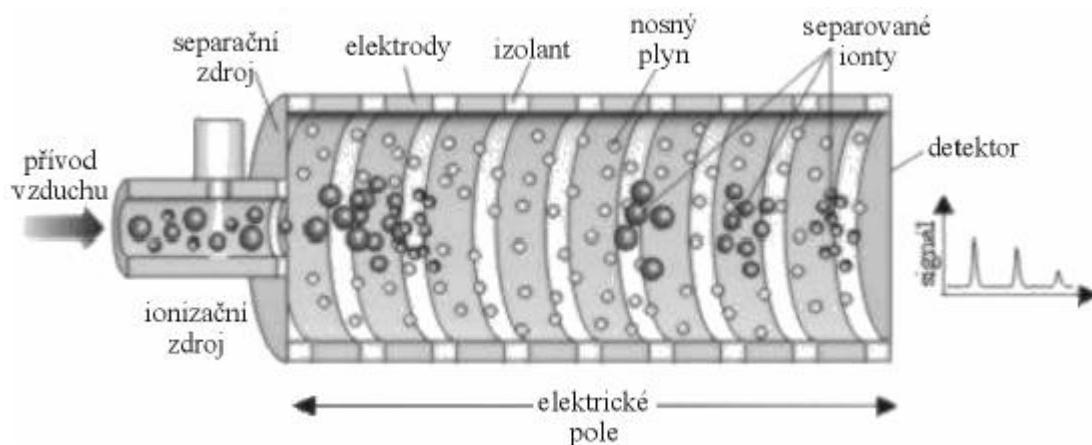
- zdroj elektromagnetického záření,
- přímač nebo detektor elektromagnetického záření,
- systém pro zpracování a vyhodnocení signálu.

Nejběžnějším zdrojem elektromagnetického záření je laser, který pracuje v infračerveném elektromagnetickém spektru. Jelikož dochází k nejvýraznější absorpci tohoto záření právě v oblasti 2,5 až 30 μm jsou tyto vlnové délky nejvhodnější. Navíc v ostatních vlnových délkách IR spektra dochází k výrazné absorpci vodní páry za běžných atmosférických podmínek. Další využitelnou oblastí je ultrafialová oblast 0,25 až 0,4 μm , ve které vykazují některé látky svá charakteristická spektra.

U infračervených a ultrafialových spektrometrů se tak využívá **absorpce** tohoto **záření** v průběhu detekce. Přístroje na této bázi se však využívají zatím jen pro analýzu plynů a pozorování v určeném sektoru.

2.4.1 Spektrometrie pohyblivosti iontů (IMS – Ion Mobility Spectrometry)

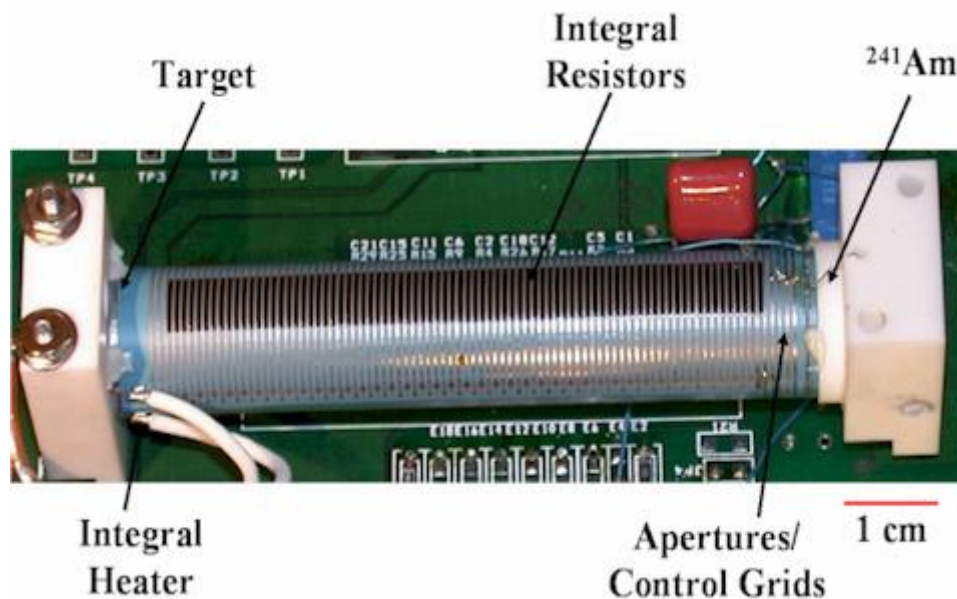
Spektrometr pohyblivosti iontů pracuje na principu rozdílné pohyblivosti iontů při průletu elektrickým polem. Na vstupu ionizační průletové komory dochází k ionizaci sledované látky a vytvoření molekulových shluků o rozdílných hmotnostech. Protože mají různé hmotnosti, budou mít i různé rychlosti. Kombinace různých zrychlení a srážek s molekulami driftového plynu má za následek i různé výsledné rychlosti proudění v trubici. Každý iont má svou iontovou pohyblivost. Ta se následně porovná s databází detektoru a je vyhodnoceno o jakou látku se jedná. Možná konstrukce spektrometru pohyblivosti iontů je znázorněna na obrázku č. 7.



Obr.7. Schéma spektrometru pohyblivosti iontů [4]

Miniaturní spektrometrie pohyblivosti iontů

Protože IMS je atraktivní technologií s miniaturním chemickým senzorem, pracujícím v normálním atmosférickém prostředí a je schopná detekovat kvantum prvků v ovzduší je tudíž perspektivním prvkem pro další vývoj. Stávající IMS detektory mají hnací trubici, složenou z mnoha elektronických prvků, potřebných pro vytvoření patřičného elektrického pole a tudíž se stávají finančně náročnějšími pro sériovou výrobu. Vytvoří se však miniaturní, nízkoteplotní, keramické (LTCC) trubky s integrovanými potenciálovými rezistory.



Obr. 8. Miniaturní hnací trubice [5]

Solid Phase Microextraction (SPME)

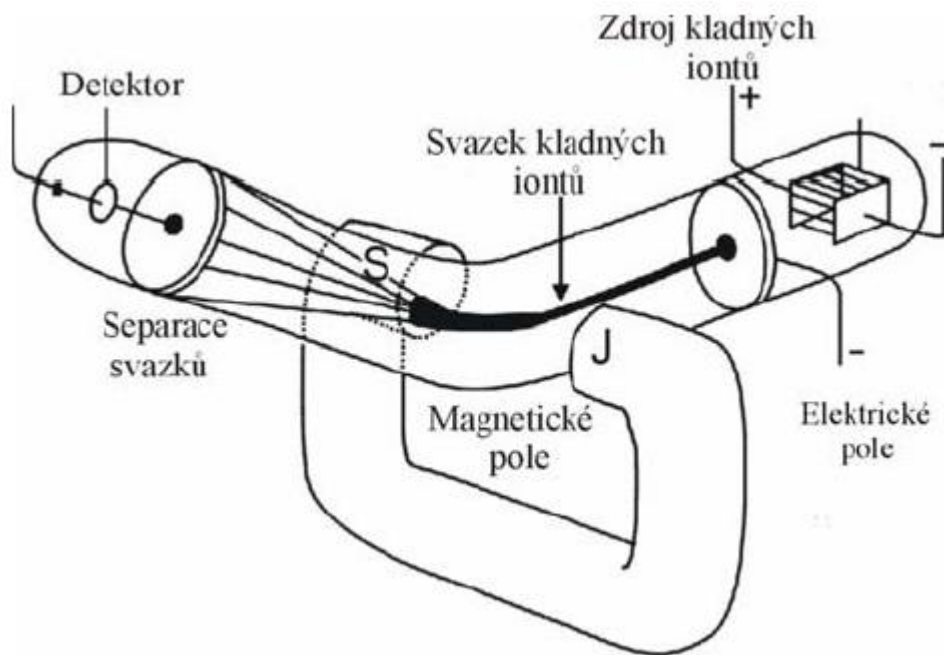
Je progresivní “solvent free” metoda přípravy vzorků, která je rychlá, ekonomická a univerzální pro mnoho aplikací. Využívá jemných vláken, potažených polymerním materiálem, na které se adsorbují sledované analyty. Pomocí této metody se urychlí extrakce těkavých a polo-těkavých látek. Zvyšuje se i citlivost celkového detektoru IMS, takže se zlepšuje i detekce v otevřených prostorech.

2.4.2 Hmotnostní spektrometrie

Hmotnostní spektrometrie je metoda, která stanovuje relativní četnost iontů v závislosti na poměru hmotnosti k náboji iontu (m/z). I když se jedná o destrukční metodu, spotřeba látky k analýze je malá. Ke vzniku hmotnostního spektra je třeba, aby proběhly následující tři procesy:

- tvorba iontů
- separace iontů
- registrace iontů

Tyto procesy probíhají ve vakuu. Separace iontů probíhá v elektrickém a magnetickém poli. V první fázi dojde k urychlení iontů v elektrickém poli a přechodem přes magnetické pole dojde k zakřivení jejich dráhy. Jednotlivé druhy iontů po průletu magnetickým polem dopadají do určitých bodů, kde je možné je registrovat. Obdržíme tak hmotnostní spektrum a jeho porovnáním s databází spekter získáme informaci o analyzované látce. Základní princip hmotnostního spektrometru je znázorněn na obrázku č. 7.



Obr. 9. Princip hmotnostního spektrometru [4]

2.5 Jaderná Kvadrupólová rezonance (Quadrupole Resonance - QR)

Jedná se o technologii využívající jaderné magnetické rezonance známé hlavně z medicíny jako tomografie. Pomocí QR dokážeme zjistit za pomoci elektromagnetických polí ve spektru radiových vln, zastoupení určitých atomových jader nacházejících se v zájmovém prostoru v chemických vazbách.

Protože jaderná kvadrupólová rezonance je jevem vycházejícím z magnetické rezonance, tak si vysvětlíme první princip magnetické rezonance.

2.5.1 Jaderná magnetická rezonance

Obecně se využívá toho, že každé atomové číslo má svůj spin – spinovou točivost (spin je charakterizován kvantovým číslem jaderného spinu “I”), tedy svůj vlastní mechanický moment hybnosti. S tím souvisí i existence jejich magnetického (dipólového) momentu. Nutno upřesnit, že jádra, u nichž se počet protonů rovná počtu neutronů, mají spin a tedy i magnetický moment nulový a tudíž nevykazují magnetickou rezonanci. Pokud se jádro s nenulovým magnetickým momentem M ocitne v dostatečně silném vnějším statickém magnetickém poli o intenzitě H , bude na něj působit moment síly $M \times H$, který se bude rovnat časové změně momentu hybnosti J .

2.5.2 Jaderná kvadrupólová rezonance

„Kvadrupólová rezonance se obejde bez silného magnetického pole, které by mohlo poškodit některé předměty v kontrolovaném zavazadle. Je založena na tom, že jádra se spinem ≥ 1 mají obecně nenulový elektrický kvadrupólový moment. Při kvadrupólové rezonanci se pozoruje přeorientování jádra mezi jeho kvantovanými orientacemi vzhledem k elektrickému napětí. Jednoduše na nesférický jaderný náboj působí moment síly, který způsobuje precesi.“ [6]

Při jaderné kvadrupólové rezonanci vyšle vysílač do prostoru zavazadla složitý puls rádiových vln o nízké intenzitě. Původní klidová orientace os rotací atomových jader zkoumaných látek je tímto pulsem narušena. Jak se jádra snaží následovně sama sebe srovnat, produkují kolem sebe svůj vlastní charakteristický rádiový signál. Tento signál je zachycován přijímačem a následně zpracován počítačem. Přístroj pátrá po protaženém jádru dusíku N^{14} , který se nachází ve výbušninách. Vlivem prostředí sousedních atomů dochází k mírnému posunu rezonanční frekvence, a můžeme tak usuzovat o jaký typ molekuly se jedná a tedy i typ látky, zda se jedná o PETN, RDX, a podobně. QR je velice specifickou metodou, jelikož jeho citlivost závisí na tvaru molekul. Může detekovat látku kdekoli v zavazadle, bez ohledu na orientaci a rozložení. Rozhodující je celkový počet zájmových molekul v zavazadle.

V praxi se používají pásová tunelová provedení těchto přístrojů pro prohlídku zavazadel a zásilek. Obsluha nemusí vyhodnocovat žádný obrazový ani zvukový signál, je přímo seznámena zda se nachází ve zkoumaném předmětu trhavina. Výrobci těchto detektorů uvádějí více než 99 % pravděpodobnost detekce výbušniny a

méně než 1% pravděpodobnost falešného poplachu. Důležité je uvést, že kvadrupólová detekce výbušnin je v podstatě radiový signál, tudíž důkladným odstíněním, případně zarušením balíčku s výbušninou, by se dalo předejít odhalení výbušniny.

Tato metoda se ještě stále vyvíjí. Je očekáváno využití pro hledání pozemních min, jelikož QR detekuje samotnou výbušninu a ne materiál ve kterém je uložena. Nicméně signál přijímaný od výbušniny je stále velmi slabý, a tak se zatím prakticky využívá jen jako podpůrný prvek v některých detektorech výbušnin. Nevýhodou pro použití jako průchozího skeneru lidí je však v tom, že je potřeba, aby člověk setrval pár sekund v komůrce, kde je na jeho tělo vysílán radiofrekvenční signál. Takový detektor pak může vypadat například jako obrázek:

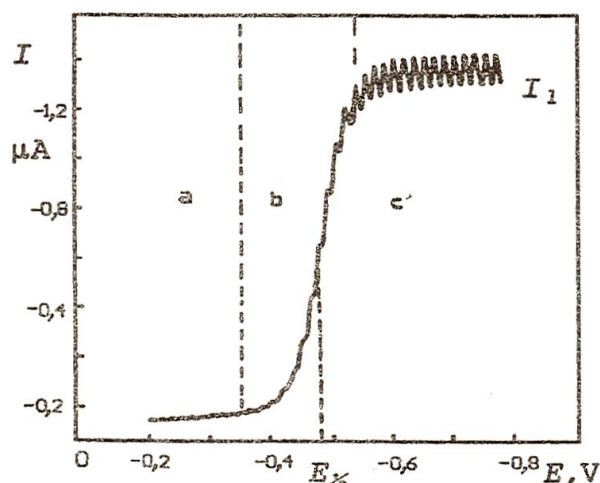


Obr. 10. Detektor výbušnin pro osoby

2.6 Polarografie (Voltametrie)

Polarografie patří mezi elektrochemické analytické metody. Je založena na elektrolýze roztoku stanovované látky. Proud prochází roztokem mezi dvěma elektrodami, z nichž jedna je tzv. dokonale polarizovatelná (realizována například jako rtuťová kapková elektroda) a druhá je tzv. nepolarizovatelná elektroda. Stanovovaná látka musí být schopná redukce nebo případně oxidace (pro účely detekce výbušnin se spíše realizuje redukce) na polarizovatelné elektrodě. Při klasickém uspořádání zvyšujeme zvolna elektrické napětí mezi oběma elektrodami a sledujeme, jak se mění proud protékající obvodem v závislosti na zvyšujícím se napětí (vkládané napětí odpovídá rozdílu potenciálů obou elektrod, takže často bývá sledována závislost proudu na potenciálu jedné, a to polarizovatelné elektrody, I v závislosti na U). Při malých hodnotách vkládaného napětí roztokem neprochází elektrický proud, protože vložené napětí nepřekročí tzv. rozkladné napětí stanovované

látky (na elektrodách nemohou probíhat elektrochemická reakce, které zajišťují přechod nábojů mezi kovem a roztokem). Když vnější napětí přesáhne napětí rozkladné, roztokem začne proud protékat a zvyšuje se s rostoucím vkládaným napětím. Velikost proudu je omezena rychlostí, jíž jsou částice stanovované látky přiváděny difúzí k povrchu elektrody, kde elektrochemicky reagují (přijímají nebo odevzdávají elektrony), a tak zajišťují přestup proudu z roztoku na kov elektrody. Po překročení určitých hodnot napětí, proud již dále neroste, protože difúze částic dosáhla maximální rychlosti, která je přímo úměrná koncentraci reagující látky v roztoku. Tento maximální proud se nazývá limitní difúzní proud (na obrázku I_l) a je přímo úměrný koncentraci stanovované látky v roztoku.



Obr. 11. Polarizační křivka [7]

a - vložené napětí nedosahuje potřebné hodnoty k průběhu elektrochemické reakce

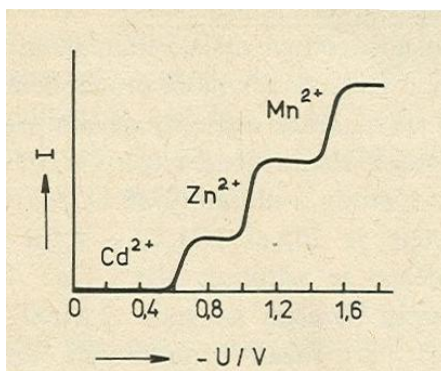
b - vložené napětí překročilo rozkladné napětí, proud je způsoben redukcí látky na katodě např. $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$, proud protékající obvodem roste při zvyšování napětí

c - rychlost pochodu elektronů mezi roztokem a elektrodou je maximální pro jejich struktury (protéká maximální proud) – limitní difúzní proud, jehož hodnota je přímo úměrná koncentraci iontu kovu v roztoku.

Pokud bychom nadále zvyšovali napětí na elektrodách (obr. 10.), tak se budou postupně rozkládat další látky v roztoku. Polohy vln vzhledem k ose napětí, jsou závislé na druhu

reagujících látek a mohou být použity jako kvalitativní ukazatel (podle toho lze určit látku reagující na elektrodě). Můžeme tak stanovit koncentraci až 10^{-5} mol/l.

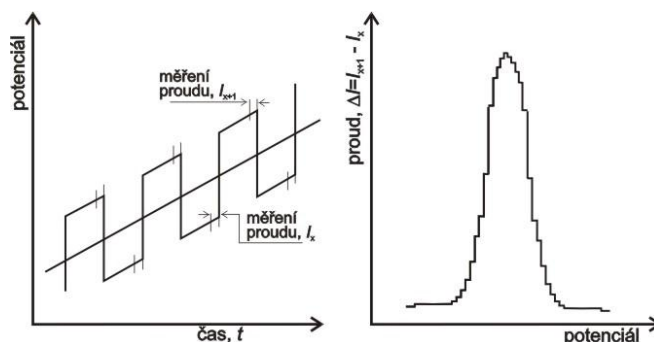
Takto tedy vypadá základní princip polarografie, v podstatě se jedná o analýzu zájmových látek, obsažených v kapalině. Dále ještě uvedu citlivější metody z hlediska detekce, používané již přímo v detektorech výbušnin. Stále se zde jedná o detektory vyhledávající výbušniny v kapalném zájmovém prostředí. Takto utvořené detektory jsou jednak finančně nenáročné a jsou schopné detekovat různé druhy IED, značkovací taganty, RDX, HMX, TNT. Vesměs však detekce druhu výbušniny závisí na materiálu elektrody. Pro efektivnější využití, by nás ale zajímala detekce výbušnin v zájmovém prostoru, jako například vojenské, civilní a dopravní sektory apod. Takové předurčení poskytuje analýza plynné voltametrie (Gas-phase voltammetric detection) popsaná dále.



Obr. 12. Příklad polarizační křivka při zvyšování napětí elektrod [7]

2.6.1 Diferenční pulsní voltametrie (Square Wave Voltammetry - SWV)

Na rovnoměrně rostoucí stejnosměrné polarizační napětí jsou vkládány pravoúhlé napěťové pulzy. Měří se proud před vložení pulzu a ke konci doby pulzu, registruje se jejich rozdíl. Záznam udávající závislost rozdílů proudu na vkládaném napětí má tvar píků (Obr. 11.). Lze tak stanovit koncentrace např. 10^{-8} mol.dm⁻³. Navíc oproti obyčejné voltametrické metodě dokážeme, díky menším krokovým napětím, vyhodnocovat látky s větší přesností.



Obr. 13. Dif. pulsní voltametrie – průběh potenciálu vkládaného na prac. elektrodu a závislost proudu na potenciálu (pík).[7]

2.6.2 Elektrochemická rozpouštěcí analýza (stripping analysis)

Stanovovaná látka se vyloučí z roztoku (elektrolyticky, adsorpcí aj.) na povrchu elektrody (grafit, platina zlato), a pak se elektrolyticky rozpouští, přičemž se měří proud obdobnými technikami, jako při polarografii - zaznamenává se polarografická vlna odpovídající rozpouštění kovu z elektrody do roztoku. Tato metoda patří k nejcitlivějším analytickým metodám vůbec. Meze detekce dosahují řádově až 10^{-10} až 10^{-12} mol.dm⁻³.

Takových výsledků lze dosáhnout díky pokroku v mikro-výrobních technikách nahrazením objemných elektrod tenkými, elektrochemickými, sensorovými pásky (easy-to-use sensor strips). Jsou to pásky, sloužící k propojení pracující elektrody a elektrolytu. Takové proužky v podobě tenkých filmů můžou být pak využity k realizaci takzvaného elektronického nosu (e-nose) plyno-polarografického detektoru (ve spojení s pokročilým zpracováním algoritmických signálů).

Přístroj s obdobným proužkem v kombinaci s vhodným zobrazovacím prvkem (screen-printing technologie), se může stát levným a přenosným detektorem výbušniny ve vodě a půdě, pro TNT se konkrétně může jednat o citlivost až 200 ppb. Právě tyto screen-printing elektrody se stávají slibnými prvky pro detekci výparů (plyno-polarografická detekce).

2.6.3 Plyno-polarografická detekce (Gas-phase voltammetric detection)

Přesná detekce výparů výbušnin v reálném čase je prvořadým požadavkem pro úspěšné odhalení skryté výbušniny na letišti, pozemních min, nebo taky silniční kontrolu.

V komerční sféře jsou hojně používány amperometrické přístroje pro detekci toxických plynů jako jsou CO, SO₂, NO_x, O₃, a další.

V plyno-polarografickém detektoru musí být tak uzpůsobená elektroda, že se k ní dostanou částičky výbušnin a zároveň je tato elektroda v roztoku elektrolytu jak je z výše zmíněného textu patrné. Avšak tento princip může být zpracován i za použití pevného skupenství senzorů. Kapalinný elektrolyt se nahradí membránou ze syntetických polymerů, které mají obsaženy vlastnosti iontů, tzv. Nafiony. Taková membrána je nanesena na mikro-elektrodě. Elektrody si můžeme představit jako 25 μm disk ze zlata, obklopený zlatým kruhem, taktéž ze zlata, prezentujícím referenční elektrodu. Nakonec je povrch pokrytý vrstvou kyseliny sírové. Takovéto uspořádání nám umožní detekovat přítomnost TNT (pokusně bylo zjištěno ve vzdálenosti 10 cm od vzorku výbušniny, zajímavostí i je že když se detektor vnořil přímo do výbušniny, tak ukazoval identickou hodnotu). Doba expozice byla do 20 vteřin. Detektory na bázi polarografie zachytávající výpary výbušnin jsou ve vývoji. Cílem u této metody je vytvoření takzvaného e-nosu v podobě kombinací různých materiálů elektrod s různými povrchovými vrstvami.

2.7 Promptní neutronová aktivační analýza (Prompt Gamma Neutron Activation analysis - PGNA)

Detektory založené na principu PGNA bombardují kontrolovaný objekt neutrony o nízké energii. Mezi neutrony a dusíkem, obsaženým ve výbušnině, probíhá jaderná reakce na povrchu zkoumaného objektu, která okamžitě produkuje gamma záření. Následně se pak toto záření o charakteristické vlnové délce detekuje a vyhodnocuje jako poplach.

Nízkou tepelnou energií neutronů si představme přibližně 0,025 eV. Při vznikajících jaderných reakcích se zachycuje neutron jádrem atomu ozařované látky a zvyšuje se tak počet jeho neutronů. Zároveň se navýší i jeho relativní atomová hmotnost o 1. Tudíž se nutně vyzáří přebývající energie ve formě promptního gama záření. Kvantum vyzářené energie se pak měří a vyhodnocuje. Jelikož dusík bývá ve výbušninách obsažen alespoň z 25 % a vyzařované kvantum jeho energie je podstatně větší (přibližně 11 MeV) než je běžný průměr (přibližně 5-6 MeV). Díky tomu je pak v celkovém energetickém spektru jednoznačně rozlišitelné, zda je v zájmovém předmětu přítomen dusík.

V praxi jsou pak pásové detektory, založené na principu PGNA, velmi rozměrné (až desítky tun) jelikož je potřeba důkladného odstínění uvnitř tunelu. Výhodou je, že detektory dokážou zjistit libovolný tvar plastické výbušniny o minimální hmotnosti přibližně 300 gramů. Jelikož radioaktivita kontrolovaného objektu nepřevyšuje hodnoty přirozené radioaktivity, tak nepoškozuje obsažené předměty. Naopak nevýhodou je při nastavení příliš nízkého alarmového prahu četnost falešných poplachů. Tyto poplachy můžou vyhlásit položky s vysokým obsahem dusíku (sýry, boty, atd.), velikost signálu je totiž závislá na množství atomů dusíku. A taky jsou poměrně delší doby vyhodnocování zájmových objektů (minuta).

2.8 Analýza terahertzových vln (Ramanovo spektrum)

Terahertzové vlny (paprsky T, T-ray) tvoří oblast elektromagnetického spektra od 100 GHz (vlnová délka 3 mm) až do zhruba 30 THz (vlnová délka 10 μ m). Oblast terahertzových vln je z mnoha pohledů poslední neprozkoumaná oblast rádiových vln a světelného spektra a je často nazývána „terahertzová mezera“, protože až donedávna jsme neuměli vyrobit zdroje dostatečně světelné a senzory dostatečně citlivé. Nedávné pokroky v ultrarychlé pulzní laserové technice a v polovodičové fyzice poprvé umožnily generování a detekci širokého pásma terahertzového světla.

Podobně jako rádiové vlny, i terahertzové vlny poměrně dobře procházejí skrz oblečení, papír, plasty, a jiné lehčí obalové materiály, takže mohou být pořízeny obrazy hustších objektů ukrytých pod těmito obalovými materiály. Terahertzové vlny navíc, podobně jako vlny světelné a na rozdíl od vln milimetrových, interagují s materiály a mnoho látek má své charakteristické reflexní i absorpční spektrum, které lze využít pro jejich identifikaci. Pomocí spektrální analýzy terahertzového paprsku zpětně odraženého od kontrabandu tedy můžeme přesně identifikovat druh materiálu, z kterého je kontraband vyhotoven, a to i z odstupu více metrů.

2.9 Kapilární elektroforéza (Capillary Electrophoresis - CE)

Kapilární elektroforéza spolu s iontovou chromatografií jsou metody využívané zejména pro anorganické výbušniny. Jelikož CE technologie má v porovnání s iontovou chromatografií lepší vlastnosti v detekci anorganických výbušnin, a také jsou méně nákladné. Anorganickými výbušninami rozumíme výbušniny tvořené dusičnanem

amonným, chloráty, rozbušky, černý prach, a tak podobně. V podstatě se zde jedná o IED (improvised explosives device).

Mluvíme-li o elektroforéze, tak máme na mysli elektrochemickou metodu detekce rychlosti nabitých částic v elektrolytu (v našem případě částic výbušnin). Analyzuje se rychlost, protože tato veličina je charakteristická pro každý druh částic, pohybujících se v elektrickém poli.

Kapilární elektroforéza v detektoru výbušnin může být pak realizována tak, že kapiláru naplníme nosným médiem, elektrolytem v podobě gelu. V této kapiláře se pak pohybují molekuly nasátých výbušnin, pohybují se přiváděným napětím a to rychlostí charakteristickou pro ně. Gel v kapiláře slouží také k selekci menších molekul, ty se v gelu pohybují rychleji než větší molekuly výbušnin. Detekčním prvkem molekul je pak ultrafialový paprsek, dopadající na detektor skrze kapiláru. Ten je z části absorbován a způsobí vyzařování částice. Paprsek, který se vyzáří, utvoří pak signální pík na detektoru. Jedná se o UV-Vis (ultraviolet - visible spectroscopy), molekulární absorpční spektroskopii. Takto vypadá v podstatě konvenční metoda CE pro detekci výbušnin, jeho detekční rychlost se uvádí 10 – 15 min, z čehož lze usuzovat, že pro přímé použití například kontroly osob je nevhodné. Nicméně pro monitorování nitroaromatických výbušnin v půdě a vodních plochách se dá chápat jako vhodný prostředek.

Technologie „mikročipová laboratoř“ (lab-on-a-chip) ve spojení s mikrofluidními systémy (microfluid systems) dokáže zvýšit přesnost této metody až na úroveň 1 – 300 ppb, v časovém intervalu do 120 sekund. Kapilární elektroforéza pro detekci výbušnin se stále vyvíjí a zdokonaluje. Její perspektivita je jednak v menších nárocích na náklady a také v tom, že jakožto bezvodná elektroforéza bude hrát důležitou roli v budoucích detektorech výbušnin pro jeho kompatibilitu s organickými rozpouštědly, používanými v před-koncentračních technikách, důležitých pro zvýšení citlivosti až na řády ppt (parts per trillion).

POUŽÍVANÉ DETEKTORY VÝBUŠNIN

Je obtížné určit, které detektory výbušnin jsou konvenčně využívány v dnešním světě. Tato oblast, totiž v posledních letech zaznamenala díky rozvoji nových technologií nové možnosti konstrukcí detekčních přístrojů. Například dříve bylo potřeba pro úspěšné vyhodnocení, zda se jedná o částice výbušnin, stěru z povrchu osob, nebo předmětů. Nyní existují tak citlivé detektory, že dokáží detekovat už jedinou částici patřící výbušnině. V této kapitole se tedy spíše pojednává o používaných detekčních principech, jako jsou detekce částic a par výbušnin, rentgeny, kamerové systémy, spektra elektromagnetických vln aplikovaných v přístrojích.

Detektory výbušnin dělíme na statické, a nebo přenosné přístroje pracující na principu detekce, vyhodnocení a signalizace par, mikroskopických částic výbušnin, nebo aktivně (pasivně - milivize) sledující fyzikální principy výbušnin. Přenosné přístroje pak můžeme ještě rozdělit na ruční a pouze přenosné. V tomto dělení jsou pak zahrnuty detektory podle určení na:

- detektory na ohledávku menších zavazadel a poštovních zásilek,
- detektory pásové pro větší zavazadla,
- detektory pro kontrolu osobních a nákladních vozidel,
- detektory pro kontrolu osob.

2.10 Ruční detektory

Ruční detektory mají přednost hlavně díky jejich velikosti a možnosti aplikovat je kdekoli je potřeba. Slouží hlavně k odhalování bombových hrozeb, při silniční kontrole, apod. V podstatě je můžeme použít na místech, kde z časových důvodů není možné vybudovat rámové, nebo statické detektory výbušnin.

2.10.1 Detektory částic a par výbušnin

Detektory částic a par výbušnin pracují na principu nasávání vzduchu okolního prostředí a podle použitých přídavných metod selektují nasáté vzorky, vyhodnocují tak páry výbušných látek. Pro vyhodnocení zda jsou přítomny částice výbušnin je většinou potřeba stěru z povrchu podezřelého předmětu a poté nechat tento vzorek vyhodnotit

detektorem. Díky stále zvyšující se citlivosti detektorů, však už existují i detektory schopné „čichat“ částice výbušnin přímo z prostředí. Jedním z přístrojů je EST-4200

EST – 4200 Ultimate Vapor Tracer



Obr. 14. EST – 4200 Ultimate Vapor Tracer

Tento takzvaný umělý nos pracuje s plynou chromatografií, je tak schopen nasávat výpary i částice výbušnin aniž by bylo třeba stěru z povrchu osob, nebo objektů. Jeho detekční prvek se pak skládá z Surface Acoustic Wave (SAW). Jedná se o další ze způsobů analyzování a detekování pikogramů výparů. Výrobce uvádí dobu analyzování vzorku výbušniny méně než 10 sekund. Detektor je schopný detekovat a identifikovat vojenské a komerční výbušniny včetně RDX, PETN, Tetryl, TNT, NG, DNT, AN a černý prach. Uvádí se, že detektor dokáže také odhalit i bombu v botě. Tento výrobek se také chlubí tím, že je schválený armádou USA a NASA.

Tento výrobek je spíše komplexním řešením v oblasti detekce výbušnin, drog a bojových plynů. Výrobci se totiž zaměřují na pokrytí co největšího počtu nebezpečných a ohrožujících druhů látek. Zároveň se však jedná o detektor na úrovni IMS detektorů ne-li lepší v oblasti detekce výbušnin. Navíc díky konstrukci jeho detektoru je přístroj schopen detekovat a kvantifikovat prakticky jakoukoliv směs výbušniny na závisející na jejich výbušných výparech.

Detektory pracující s Ramanovou spektrometrií

Terahertzová analýza vln se stále zdokonaluje a v posledních letech udělala skutečný pokrok až realizovala účinný systém schopný detekovat širokou škálu nebezpečných látek.

V praxi je pak jejím hlavním využitím v oblasti detekci výbušnin detekování výbušnin kapalných konzistencí. First Defender XL detektor výbušnin a výbušných složek pracující s terahertzovými vlnami, schopný detekce hlavně kapalných výbušnin. U plastických trhavin neprojevuje v některých případech dostatečnou detekční schopnost.

Rozměry přístroje jsou přibližně 25 cm na výšku, tloušťka pak asi 5 cm. Použitá optika umožňuje i měření v blízkosti vlnové délky excitačního laseru. Pro tento spektrometr byl také navržen mechanismus identifikace látek - hledání ve spektrálních knihovnách, který výrazně potlačuje chyby pozitivní identifikace (hlášení nesprávné pozitivní identifikace), dokonce si umí poradit i se směsmi látek (až do pěti hlavních komponentů).

Spektrometr umožňuje nejen měřit přímo práškové materiály, kapaliny, suspenze, folie, identifikovat materiál plastových kontejnerů atd., ale v řadě případů je možné měření i přes vlastní obal. Omezující je, že obal musí být průhledný tak, aby jím procházel laserový paprsek.

Tento spektrometr umožňuje identifikovat více jak 3500 nebezpečných látek, výbušnin, kapalin, drog, plastů, bílých prášků atd. a to i v jejich směsích. Databázi přístroje je možné snadno doplňovat o další látky, které je potřeba identifikovat, což je velké plus v oblasti detekce podomácku vyráběných výbušnin. Hlavní předností Ramanovy spektrometrie je to, že není rušena vodou, je možné tedy analyzovat i roztoky nebo vlhké vzorky.

Ramanův spektrometr je v praxi využitelný hlavně pro potřeby kriminalistickotechnického expertizního zkoumání – rychlé identifikaci výbušnin na místě činu (domovní prohlídky, zajištěný nástražný výbušný systém (NVS), zbytky výbušnin po výbuchu NVS, silniční kontroly, apod).

Umožňuje měření vzorku na vzdálenost cca 1,5 cm (ohnisková vzdálenost), dále s použitím kyvety se vzorkem, nebo pomocí optické sondy, spojené s vlastním přístrojem 1 m dlouhým optickým kabelem. Sondu lze snadno nasadit, sejmout a dekontaminovat. Po připojení k vlastnímu přístroji není vyžadována žádná změna nastavení.

Sonda je vhodná především pro:

- přesná měření v obtížně dosažitelných místech,
- identifikaci látek v nádobách, sudech a kontejnerech na odpad,
- přesné snímání heterogenních směsí.



Obr. 15. First Defender XL

Shrnutí firstdefenderu:

Detektor obsahuje velmi rozsáhlou databázi zájmových výbušnin a pozitivem je, že se dá tato databáze lehce rozšiřovat o nové sloučeniny trhavin. Takový databázový systém považují za velmi perspektivní pro účinné a široké spektrum detekování výbušnin.

Analýza detekovaných výbušnin trvá většinou do 1 minuty, maximálně se může měření protáhnout o několik desítek sekund. Hlavní předností je možnost identifikace výbušniny skrz plastický obal, uzavřenou PET láhev, a podobně. Proto je také vhodný spíše pro silniční prohlídky, nebo prohlídky na místě, v terénu.

Nebezpečným faktorem detektoru může být to, že se dají nalézt sloučeniny výbušnin které není schopen detekovat, na druhou stranu se takovéto sloučeniny vyhodnotí jako nemožné identifikace.

Úspěšnost měření a identifikace se pohybuje asi kolem 80 % podle charakteru výbušniny. Detektor hůře, nebo i vůbec není schopen detekovat některé plastické výbušniny.

Defender má výdrž baterií v terénu až 5 hodin, rychlá akceschopnost. Detektor je připraven k aplikaci do minuty.

2.11 Statické, rámové a přenosné detektory

Rámové detektory nám slouží ke kontrole procházejících osob. Prakticky to jsou skenery osob. Oproti statickým (pásovým) detektorům, které jsou určeny ke skenování zavazadel vstupujících do hlídané oblasti. Statické detektory mají takové rozměry, že se nedají přenášet z místa na místo jen tak. Oproti statickým a rámovým detektorům existují také přenosné detektory výbušnin. Jedná se o větší přístroje, než jsou ruční detektory, ale zároveň se dají bez větších obtíží přenášet. Jsou to například detektory pro kriminalistické úkony, určené ke zkoumání povýbušných prostředí. Pak to jsou detektory pro odhalení výbušných dopisů, nebo podezřelých oběktů.

2.11.1 Detektor částic par a výbušnin

Large vehicle bomb detection system VE-6000

Firma Scintrex Trace vyvinula kontrolní, rámové zařízení pro průjezdy vozidel do střežených objektů. Detekce par a částic výbušnin probíhá za pomoci kombinace plyné chromatografie a spektrometrie pohyblivosti iontů. Standardně vyráběný systém je o rozměrech: 2,2 m na šířku x 2,25 m na výšku x 8 m na délku. Výrobce samozřejmě nabízí i větší provedení podle potřeby. Vyhodnocovací čas je v průměru menší než 1 minuta, avšak závisí na vlastním operačním nastavení. Výrobce uvádí, že přístroj je schopen detekovat TNT, NG, AN, EGDN, o-MNT, p-MNT, DMNB, bezdýmný prach, dynamit a další komerčně vyráběné výbušniny. Samotný detektor pracuje na úrovních pro výpary v jednotkách ppt (pro částičky), je schopen rozeznat velikosti od nanogramů po pikogramy. Detekční systém VE-6000 nabízí i možnost implementace dalších doplňkových detektorů a úprav ke sledování podvozku vozidla, dálkové operování, automobilové vážení atd. V podstatě jde o komplexní řešení pro ochranu průjezdů před výbušninami. Samozřejmě pokud budou výbušniny dostatečně sofistikovaně zabaleny tak by nemusely být detekovány vůbec, proto by bylo vhodné využít ještě nějakého dodatečného skeneru, avšak by se tak celkový průběh kontroly podstatně prodloužil, a to může být v některých případech nežádoucí.



Obr. 16. Příjezdový detekční systém VE-6000

2.11.2 Rentgenové detektory

Rentgenové detektory nejčastěji představují prvotní stupeň při pásové prohlídce zavazadel. Rentgenovými paprsky jsme schopni prozářit zavazadlo, a dnes už i automaticky vyhodnotit, zda se v zavazadle nachází nějaká výbušnina plastické konzistence. U kapalin rentgeny dokážou pouze vyhodnotit, že se jedná o kapalinu, a je tak potřeba dalšího prozkoumání zavazadla jiným detektorem. Dále jsou komerčně k dispozici přenosné detektory určené pro balíčky a podezřelé objekty, u kterých je podezření na výbušninu. Rentgenový detektor dokáže odhalovat i rozbušky. Nakonec se začínají dostávat do oběhu i bezpečnostní rámové detektory skenující povrch těla osob. Pokud se jedná o rentgeny, ozařující energií menší jak $2,5 \mu\text{S}$, což jsou rentgeny schopné zobrazit výbušninu ukrytou v lidských dutinách, tak takové množství záření by už mohlo ohrožovat zdraví člověka po více takových častých ozařováních. Toto záření je srovnatelné jako dvouhodinový let v 10 km výšce. Na druhou stranu pokud se jedná o Comptonovo rozptýlené záření odrazené od povrchu těla, které je rovné $0,05 \mu\text{S}$, pak nehrozí žádná újma na zdraví. Nevýhodou zůstává potřeba otočení se osoby. A také vadí široké veřejnosti zobrazování jejich intimních partií na monitoru operátora.

Z představitelů rentgenových detektorů je jedním z nejznámějších a nejvěrohodnějších firma Smiths Heimann. Tato firma má přes 40-tiletou praxi v oblasti detekce výbušnin rentgenovými paprsky a přes 20 000 detektorů výbušnin v provozu po celém světě.

Statický detektor výbušnin HI-SCAN 10080 EDtS

Firma Smiths Heimann vyrábí celkem 3 rentgenové detektory určené přímo pro detekci výbušnin. Nejsofistikovanějším a komplexním řešením je právě EdtS verze.



Obr. 17. Hi-SCAN 10080 EDtS

Detektor kombinuje vyhodnocování atomového čísla ozařovaného objektu a jeho hustotu. Tímto spojením se dá dosáhnout maximální úrovně zobrazení předmětů v zabaleném zavazadle. Systém je schopen automatického vyhodnocování snímků a upozorňuje tak pouze na podezřelé předměty. Dokáže oskenovat až 1800 zavazadel za hodinu rychlostí 0,5 m/s. Na obrázcích můžeme vidět jak vypadají rentgenové snímky zavazadel. Pseudobarevné zobrazení dovoluje vyhodnotit skryté výbušniny a lépe odlišit obsažené předměty.



Obr. 18. Příklad zobrazení zavazadla po průchodu rentgenovým detektorem

2.11.3 Kamerová pozorování

Kamerové systémy dávají možnost kontrolovat veřejné prostranství, tak že automaticky vyhodnocují podle daného algoritmu, zda se nestala nějaká nebezpečná situace. Takový kamerový systém může pracovat na principu snímání milimetrových vln. Těm se dále budu věnovat.

Ego



Obr. 19. Průchozí rám Ego

Jako představitele detektoru milimetrových vln, v průchozích detektorech výbušnin, jsem zvolil aktivní systém od společnosti Smiths Detection. Jedná se o skener schopný odhalit nekovové předměty ukryté pod oděvem člověka, takže jakoukoliv výbušninu ukrytou pod oděvem. Skener snímá pohybující se osoby v reálném čase. Procházející osoba si stoupne do skenovací oblasti a postaví se před panel. Tělo pasivně vysílá milimetrové vlny, prostřednictvím nich můžeme vidět skrze tenké ošacení. Aktivní systém Ego využívá ještě soustavy vysílacích antén k lepšímu rozlišení skrytých předmětů pod většími vrstvami oblečení. Další výhodou oproti detektorům snímajících zpětný rozptyl rentgenových paprsků je to, že se osoby snímají v pohybu, v reálném čase, což zvyšuje pravděpodobnost odhalení skrytých výbušnin. To jak se skenovaná osoba pohybuje nám dává další informace a můžeme spíše zachytit ukrytou bombu pod ošacením. Samozřejmě pokud bude výbušnina skryta v tělní dutině, tak nám tento přístroj nijak nepomůže. Nicméně velkou bariérou proti nasazení těchto průchozích skenerů jsou stále protesty veřejnosti, proti zobrazování jejich intimních partií. Oproti již zmíněným rentgenovým průchozím detektorům, alespoň nehrozí ještě protesty kvůli dávkám rentgenového záření (které jsou ale i tak na velmi nízkých úrovních). Jako obranu proti těmto námitkám, systém Ego nezobrazuje jednu osobu za druhou operátorovi, ale jen pokud se jedná o zaznamenání objektu pod šaty. Tím je z části zajištěna ochrana soukromí osob, dále je zavedení

rozmazání obličeje, a v poslední řadě taky neukládatelnost dat. Ego detektory byly poprvé představeny v Berlíně 28. – 29. října 2008. I přes všechna jeho opatření, chránící soukromí, jsou veřejností odmítány, i když je schválila Evropská komise pro zavedení na letištích, tak německá veřejnost Ego stále odmítá.

3 TRENDY MEZI DETEKTORY VÝBUŠNIN

Jednotlivé fyzikální, fyzikálně-chemické a chemické principy využívané pro detekci výbušnin jsou hlavním východiskem pro budoucí detektory. Stále se zdokonalující technika v těchto oblastech, hlavně díky miniaturizaci, posouvá dříve využívané technologie pouze v laboratořích do bezpečnostních skenovacích systémů. Nejslibnějším prvkem pro detekci výbušnin se jeví nukleární kvadrupólová rezonance. Tato technologie dosahuje nejnižšího procenta falešných poplachů, a je také dostatečně úspěšná v odhalování výbušnin. Avšak má také své nevýhody, odstíněním nástražného výbušného systému můžeme zamezit detekci. Rovněž tato technologie není schopna odhalit úplně všechny výbušniny, ale pouze ty, v nichž je obsažen dusík N^{14} . Tento nedostatek by se dal ale vyloučit zařazením dalšího detektoru do systému, což by se ale zase podstatně prodražilo. Jednoznačným cílem pro úspěšné odhalení výbušniny je vytvoření systému detektorů skládajících se z několika detekčních prostředků, protože současné detektory výbušnin samy o sobě nejsou schopné dostatečně vysokého procenta odhalování výbušnin. Musí se proto jednotlivé metody kombinovat. To opět vede k tomu vytvořit komplexní systém zautomatizovaného zařízení, po jehož průchodu již nebude potřeba dalšího ohledávání osob, zavazadel, apod. Myslím, že právě kvadrupólová rezonance bude zahrnuta do takového systému, popřípadě se objeví nějaká další nová technologie. Musíme si však uvědomit, že výzkumy technologií určených pro detekování výbušnin jsou nesmírně složité a zdlouhavé, jelikož probíhají mnohdy na atomových úrovních. Pak jejich následná implementace do komerčního využití s dostatečnou citlivostí na pokud možno dálkové odhalování výbušnin je velmi složitým vývojovým procesem. Budoucím požadavkem je navíc hlavně potřeba i dálkové odhalení, sledování lidského chování. V podobě kamerového pozorování se dostávají do provozu zatím jen milivizní detektory, snímající povrch lidského těla.

Jedním z dalších budoucích požadavků je vytvoření takového systému, který bude schopen rozpoznat výbušninu ještě předtím, než se jí stane. Jedná se hlavně o kapalné směsné výbušniny. Budoucí detektor by měl být schopen identifikovat tyto dvě samy o sobě neškodné látky a vyhodnotit je jako výbušninu. Takový systém nese riziko falešných poplachů, alespoň prozatím.

Dalším závažným rizikem jsou teroristické automobilové bombové útoky. Díky možnosti umístit do vozidla značné množství výbušniny, způsobující masovou destrukci. Popřípadě

pašování tržavin přes hranice. Pro prozkoumání zaparkovaného vozidla, je pak nejlepším způsobem odhalení nástražných výbušných systémů, rentgenový dodávkový systém: „Tento rentgen byl vyvinut společností AS&E a nese označení ZBV (Z Backscatter Van Drive-By Screening System). ZBV slouží k jakékoliv detekční kontrole v jakémkoliv místě. Nejčastěji se však užívá pro kontrolu dopravních prostředků. Celý rentgenový systém je zabudován do komerčně využívané dodávky. Rentgenový zářič včetně rentgenového detektoru se umísťuje do nákladního prostoru a operátorské prostředí je stanoveno v kabině řidiče a na místě spolujezdce. Celý rentgen pracuje na technologii zpětného rozptylu a navíc obsahuje speciální detektory pro odhalení radioaktivních materiálů. Tyto detektory snímají neutrony, které se štěpí při jaderných reakcích u radioaktivních látek. Kabina dodávky je vybavena dvěma vestavěnými monitory, na nichž operátor vyhodnocuje rentgenové snímky. ZBV může pracovat ve stacionárním a pohyblivém režimu. Ve stacionárním režimu je ZBV zaparkován na jednom místě a zkoumané objekty (vozidla) projíždějí kolem v úrovni detekčního pole rentgenového záření. Operátor může být přítomen v kabině vozidla, která je dokonale odstíněna nebo může celý systém ovládat z jiného místa. V pohyblivém režimu je naopak v pohybu ZBV a skenuje všechny předměty v dosahu rentgenového paprsku. Protože rentgenový systém využívá metody zpětného rozptylu, dávkový ekvivalent rentgenového záření je zanedbatelný. ZBV může sloužit jako dokonalý prostředek k prohlížení zaparkovaných vozidel na ulicích nebo na střeženém pozemku.“ [3]

Dalšími trendy jsou také kombinace s plynou chromatografií a dalšími předkoncentračními technikami, zajišťujícími zvětšení citlivosti detektoru. Takové technologie pak můžou vypadat jako například EST-4200. Dokáží plně nahradit stávající detektory par a částic, pracující hlavně na principu zachytu iontů, díky jejich podstatně nižší ceně. Tudíž se stanou dostupnějšími pro širší veřejnost.

Nicméně díky miniaturizaci technologií až na atomovou hranici se daří vytvářet stále novější systémy. Takový budoucí systém bude obsahovat miniaturní senzory schopné detekovat změny magnetického pole na úrovni mozkových vln člověka při snění. Tato technologie udělala pokrok od roku 2004 do 2007 v 1000 krát zvýšené citlivosti. V podstatě se jedná o velmi citlivý magnetometr prostředí, který má potenciál pro nízkorozpočtovou masovou produkci. Výzkum provádí NIST (National Institute for Standards and Technology).

Je taky možné, že bude jednou možné očipování veškerých lidí miniaturními detektory, které by střídali data pohybu osoby, kde se nachází, v jakém prostředí a zda se v jeho okolí nevyskytují výbušné výpary. Tyto data by se pak v reálném čase přenášela na jednotlivé ústředny, kde by se programově vyhodnocovaly, a v případě potřeby by zasáhla výjezdová jednotka.

V poslední řadě se také objevují biosenzory. Jedním takovým je například VASOR (Volatile Analysis by Specific Odour Recognition). Tento prototyp se skládá ze tří včel umístěných v boxu kde kamera snímá jejich jazyky, odpověď je pak ano/ne zda se jedná o výbušninu či nikoliv. Do boxu se včelami je nasáváno okolní ovzduší, včely tak detekují výpary výbušniny. Výrobce uvádí, že jsou včely schopny detekovat s citlivostí až na ppt. Biosenzor detekuje výbušniny TNT, DNT, Semtex, PE4, DMNB, střelný prach. Taky uvádí, že výcvik včel trvá minuty. Pokusem bylo taky ověřeno, že se můžou použít i včely volně v přírodě. Výrobce je taky schopen dodat vycvičené včely kamkoliv.

ZÁVĚR

V této práci bylo popsáno nebezpečí výbušnin, jejich zneužití pro teroristické útoky a jejich vlastnosti znesnadňující samotné detekování. Práce popisuje jednotlivé detekční techniky, používané v komerčních detektorech výbušnin. Popisuje se poměrně hodně metod, avšak existují ještě další nepopisované metody, a detektory, jelikož buď nejsou tak často používané, nebo se jedná o nově vyvíjené metody. Popřípadě se jedná o metody, ne příliš vhodné pro rychlou a masovou detekci, jako je například detekce založená na barevných chemických reakcích. Je taky nutné podotknout, že existují i detektory čistě na hledání min, nebo detektory kontrolující výbušnost prostředí v rizikových, průmyslových odvětvích. Práce se snažila zaměřit spíše na bezpečnostní využití rentgenu. Jednotlivé principy detekcí, se pak prolínají navzájem, a utvářejí komplexní systém určený na širokou škálu nebezpečných a jinak relevantních předmětů jako drogy, včetně výbušnin. Ke konci práce je pak uvedeno pár představitelů jednotlivých detekčních principů v ručním a nepřenosném provedení. Nakonec jsou pak shrnuty současné trendy v oblasti detekce výbušnin, a jejich budoucí vývoj.

V současnosti je vidět, že se dostávají do komerčního zpracování metody dříve zkoumané, takže je vidět podstatný krok kupředu, hlavně díky miniaturizaci technologií a materiálnímu inženýrství se dostávají metody dříve využitelné pouze v laboratořích do komerčních detektorů. Existuje taky spousta institucí zkoumající novější provedení technologií a kombinací předkoncentrací v detektorech, zlepšující tak jejich citlivost a schopnost odhalovat stále nové výbušné substance.

Hlavním nedostatkem však stále zůstává velká finanční náročnost těchto detektorů, proto se začínají objevovat metody pracující s biosenzory, a dříve pouze chemické metody se díky novým materiálním technologiím mohou také aplikovat jako účinné a hlavně levné varianty detektorů. V neposlední řadě však stále zůstávají i cvičení psy jako poměrně stále účinným detektorem výbušnin, navíc takový pes budí respekt, a tím tak může prozradit případného pachatele pracujícího s výbušninou, nebo přímo mající u sebe výbušné zařízení. Navíc hlídky chodící se psi taky působí příznivě pro veřejnost, že mají větší pocit bezpečí.

Dalším poznatkem je, že výrobcem uváděné citlivosti detektorů mohou být mylné, což vede ke snížení účinnosti detektoru. Proto by se měla provádět nezávislá studie těchto údajů.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This paper described the danger of explosives, their misuse for terrorist attacks and their properties that makes its own detection. The work describes the detection techniques used in commercial detectors for explosives. It describes the methods quite a lot, but there are other methods nepopisované, and detectors, as so often either not used or is a newly developed method. Alternatively, it is a method, not very suitable for rapid detection and mass, such as color detection based on chemical reactions. It also should be noted that there are detectors purely search mine detectors and explosive environment in controlling risk, industries. This work has sought to focus on the use of security x-ray. The various principles of detection, then cut each other, and create a comprehensive system designed for a wide range of hazardous and other relevant subjects such as drugs, including explosives. At the end of the work is then referred to a couple of different detection principles in the manual and non-implementation. Finally, are summarized current trends in the detection of explosives, and their future development.

At present, it can be seen that the reach of commercial processing methods previously examined, so you can see a significant step forward, mainly due to miniaturization of technology and material engineering to get the method previously used only in laboratories to commercial detectors. There are too many institutions exploring the implementation of newer technologies and combinations předkoncentrací in the detector, thus improving their sensitivity and ability to detect ever more explosive substance.

A major drawback, however, remains a big financial performance of these detectors, therefore, are emerging methods of working with biosensors and chemical methods previously only thanks to the new material technology can also be used as effective and most inexpensive option detectors. Last but not least, however, still remain and exercise dogs as relatively more effective detection of explosives, plus a dog gives respect, and thus may reveal a possible perpetrator of working with explosives, or directly with each other in an explosive device. In addition, patrols walking the dogs also act positively to the public that have a greater sense of security.

Another finding is that the manufacturer reported the sensitivity of detectors can be wrong, leading to a reduction of detector efficiency. They should carry out independent studies of these data.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BREBERA, Stanislav. Vojenské trhavy a technologie výroby trhavinových náloží. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2005. 111 s. ISBN 80-7194-725-3.
- [2] BREBERA, Stanislav. Vojenské trhavy II : trhavy různé konzistence. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2002. 251 s. ISBN 80-7194-497-1.
- [3] BARÁK, Petr. Trendy v oblasti bezpečnostních rentgenů. Zlín, 2008. 80 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Lukáš, CSc.
- [4] Odbor obranné standardizace [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.oos.army.cz/cos/cos/666503.pdf>>.
- [5] Sandia national laboratories [online]. 2000 [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.sandia.gov/mstc/MsensorSensorMsystems/technical-information/Ion-Mobility-Spectrometry.html>>.
- [6] TUREČEK, Jaroslav. Policejní technika. Plzeň : Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2008. 316 s. ISBN 978-80-7380-119-9.
- [7] Univerzita Jana Evangelisty Purkyně [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <www.fzp.ujep.cz/~synek/analytika/texty/5PolarografiePred.doc>.
- [8] TUREČEK, Jaroslav. Technické prostředky bezpečnostních služeb II : detektory pro bezpečnostní prohlídku osob, zavazadel a zásilek. Praha : Policejní akademie České republiky, 1998. 97 s. ISBN 80-85981-81-5 .
- [9] JOHAN, Zdeněk, SLÁNSKÝ, Ervín, ROTTER, Robert. Analýza látek rentgenovými paprsky. Praha : SNTL, 1970. 257 s.
- [10] The engineer [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.theengineer.co.uk/Home/default.aspx>>.
- [11] Global Security Solutions [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.global-security-solutions.com/index.htm>>.
- [12] Smiths Detection [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.smithsdetection.com/eng/index.php>>.
- [13] ŠTANCL, M, MOŠŤÁK, P. Detection of plastic explosives in explosives devices. Výzkumná zpráva VÚPCH, Pardubice, 2003. 9 s.

- [14] VÚPCH EXPLOSIA. Poznámky z konzultace s Ing.,Dr Miroslavem Štanclem. 2009.
- [15] ŠTANCL, Miroslav. DETEKČNÍ TECHNIKA PRO LETIŠTĚ A JEJÍ OVĚŘOVÁNÍ. In Výzkumná zpráva VÚPCH. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 46.
- [16] Scintrex Trace [online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.scintrextrace.com>>.
- [17] Inter Science [online]. [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/home>>.
- [18] Science Direct [online]. [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [19] Studium na FCHI [online]. 2000 [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <placek.lukas.sweb.cz/pdf_soubory/CE.pdf>.
- [20] Public transportation security, Applicability of Portable Explosive Detection Devices in Transit Environments [online]. 2004 [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <http://www.trb.org/news/blurb_detail.asp?id=3797>.
- [21] ŠČUREK, Radomír. Vybrané technické prostředky detekce a pyrotechnická ochrana na letišti 2008 VŠB. Ostrava, 2008. 62 s. Oborová práce.
- [22] THIESAN, Lisa, et al. Survey of Commercially Available Explosives Detection Technologies and Equipment 2004. [s.l.] : [s.n.], 2005. 97 s.
- [23] GARDNER, J.W., YINON, J. Electronic Noses & Sensors for the Detection of Explosives. Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2004. NEXT GENERATION TRACE EXPLOSIVES DETECTION SYSTEMS, s. 289-299.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

IED	Improvised Explosive Device – improvizované výbušné zařízení.
NG	Nitroglycerin.
EGDN	Nitroglykol.
DEDGN	Dyethylenglykoldinitrát.
RDX	Hexogen.
PETN	Pentrit.
TNT	Trinitrotoluen.
AN	Dusičnan amonný.
DMNB	2,3-dimethyl-2,3-dinitrobutan.
CT	Computed Tomography – počítačová tomografie.
ECD	Electron Capture Detection – detekce elektronového záchytu.
GC	Gas Chromatography – Plyná chromatografie.
IMS	Ion Mobility Spectrometry – spektrometrie pohyblivosti iontů.
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramic.
QR	Quadrupole Resonance – kvadrupólová rezonance.
SWV	Square Wave Voltammetry – Diferenční pulsní volumetrie.
CL	Chemiluminiscentní detekce.
SPME	Solid Phase Microextraction.
PGNA	Prompt Gamma Neutron Activation – promptní gama neutronová analýza.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
SAW	Surface Acoustic Wave.
ZBV	Backscatter Van Drive-By Screening Systém.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Elektromagnetické spektrum.....	16
Obr. 2. Vznik rentgenového záření.....	17
Obr. 3. Princip Brzdného záření [3].....	18
Obr. 4. grafické znázornění spektra záření.....	19
Obr. 5. Princip charakteristického záření [3].....	20
Obr. 6. Princip Comptonova rozptylu záření [3].....	20
Obr.7. Schéma spektrometru pohyblivosti iontů [4].....	27
Obr. 8. Miniaturní hnací trubice [5].....	28
Obr. 9. Princí hmotnostního spektrometru [4].....	29
Obr. 10. Detektor výbušnin pro osoby.....	31
Obr. 11. Polarizační křivka [7].....	32
Obr. 12. Příklad polarizační křivka při zvyšování napětí elektrod [7].....	33
Obr. 13. Dif. pulsní voltametrie – průběh potenciálu vkládaného na prac. elektrodu a závislost proudu na potenciálu (pík).[7].....	34
Obr. 14. EST – 4200 Ultimate Vapor Tracer.....	39
Obr. 15. First Defender XL.....	41
Obr. 16. Průjezdový detekční systém VE-6000.....	43
Obr. 17. Hi-SCAN 10080 EDtS.....	44
Obr. 18. Příklad zobrazení zavazadla po průchodu rentgenovým detektorem.....	44
Obr. 19. Průchozí rám Eqo.....	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Závislost tenze par na teplotě.....	14
---	----

