

# DETEKTOR MO-2M JAKO URZĄDZENIE DO WYKRYWANIA MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

Jan Bokszczanin, Tomasz Ludwikowski, Andrzej Wawro

## Abstract

*Terrorist threats associated with attempts to place explosives in the mass transport including airplanes, require prevention. Fast and efficient detection and identification are one of the methods. For this purpose portable screening facilities are used which operation is based on several physicochemical phenomena. Among them a non-linear dependence of the ion mobility on alternating electrostatic field intensity (FAIMS) is exploited. Based on this phenomenon a MO-2M detector has been constructed. In this work the physicochemical principles of IMS and FAIMS spectrometers, a brief review of results from scientific reports and principles of operation of the MO-2M detector are discussed. We also report investigation results of belongings of the Smolensk crash victims for traces of explosives.*

**Keywords** - explosive materials, detector MO-2M, FAIMS.

## Streszczenie

*Zagrożenia terrorystyczne związane z próbami umieszczenia materiałów wybuchowych (MW) w środkach masowego transportu w tym w samolotach, wymagają przeciwdziałania. Jednym ze sposobów jest szybkie i skuteczne ich wykrywanie oraz identyfikacja. Do tego celu służą m.in. przenośne urządzenia skryningowe wykorzystujące zjawiska fizykochemiczne. Wśród nich jest nieliniowa zależność ruchliwości jonów od natężenia zmiennego pola elektrostatycznego (FAIMS). W oparciu o to zjawisko został skonstruowany detektor MO-2M. W niniejszej pracy zostaną przedstawione fizykochemiczne zasady działania spektrometrów IMS i FAIMS, krótki przegląd danych z literatury naukowej, zasady działania detektora MO-2M, a także wyniki badań przedmiotów, które towarzyszyły ofiarom Katastrofy Smoleńskiej w chwili śmierci, na okoliczność obecności śladowych ilości MW.*

**Słowa kluczowe** – materiały wybuchowe, detektor MO-2M, FAIMS.

## 1. ZAGROŻENIA TERRORYSTYCZNE WE WSPÓŁCZESNYM ŚWIECIE

W dzisiejszych czasach zagrożenia terrorystyczne mają olbrzymi wpływ na działalność oraz postępowanie indywidualnych osób jak i całych społeczeństw. Działania terrorystyczne obejmują transport oraz próby umieszczenia przez terrorystów ładunków wybuchowych w miejscach publicznych. Ich celem jest dokonanie jak największego spustoszenia i strat ludzkich głównie w krajach wysoko rozwiniętych. Ataki terrorystyczne polegające na

zdetonowaniu ładunków wybuchowych znacząco nasiliły się w XXI wieku. Jednak większość tych materiałów jest możliwa do wykrycia przez służby kontrolne, odpowiednio przeszkolone i wyposażone w specjalistyczny sprzęt. Do takich urządzeń należy detektor MO-2M umożliwiający skuteczne wykrycie śladowych ilości materiałów wybuchowych. Wykorzystuje on metodę FAIMS, która jest omówiona w początkowej części niniejszej pracy. Urządzenie jest przeznaczone do wykonywania badań skryningowych, czyli badań przesiewowych, na podstawie których można wyeliminować bądź przekazać do dalszego badania próbki lub osoby, u których zostały wykryte materiały wybuchowe.

## 2. FIZYCZNE PODSTAWY DZIAŁANIA SPEKTROMETRU RUCHLIWOŚCI JONÓW

Cząsteczka obojętna lub zjonizowana w nieobecności pola elektrycznego porusza się ruchem chaotycznym. Jednak ich średnia pozycja w przestrzeni nie zmienia się. Po przyłożeniu pola elektrostatycznego na cząsteczkę zjonizowaną zaczyna oddziaływać siła. W wyniku jej działania oraz wskutek zderzeń z innymi cząsteczkami powietrza lub gazu buforowego cząsteczka dodatkowo zaczyna poruszać się ze średnią stałą prędkością wzdłuż linii pola. Prędkość ta jest proporcjonalna do natężenia pola elektrostatycznego, a stała proporcjonalności nazywana jest ruchliwością jonu

$$v = KE \quad (1)$$

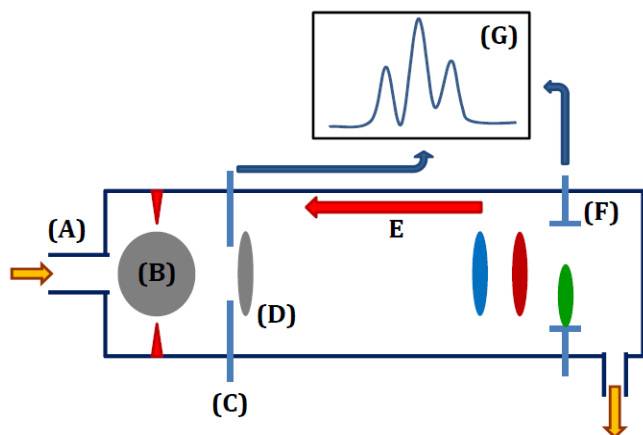
gdzie:  $v$  - prędkość,  
 $E$  - natężenie pola elektrostatycznego,  
 $K$  - ruchliwość.

W literaturze naukowej za jednostkę ruchliwości przyjęto  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ruchliwość jest wielkością dobrze charakteryzującą cząsteczkę. Właściwość ta została wykorzystana w spektroskopii ruchliwości jonów (*ang. ion mobility spectroscopy, IMS*) – technice pozwalającej na identyfikację jonów.

Z dobrym przybliżeniem spektrometr można określić jako rurę z wbudowanymi elementami umożliwiającymi przeprowadzenie pomiaru (Rys. 1).

Po wprowadzeniu cząstek tworzących parę badanej substancji do spektrometru przez wlot (A) poddawane są one działaniu czynnika jonizującego w obszarze (B). Może nim być promieniowanie emitowane przez radioaktywne

- 1) Dr inż.. Jan Bokszczanin, Korporacja Wschód Sp. z o.o. (e-mail: biuro@korporacjawschod.pl)
- 2) Mgr inż. Tomasz Ludwikowski, Korporacja Wschód Sp. z o.o. (e-mail: tomulud@gmail.com)
- 3) Prof. nzw. dr hab. Andrzej Wawro, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk (e-mail: wawro@ifpan.edu.pl)



Rys. 1. Schemat budowy spektrometru IMS. Szczegółowy opis w tekście.

źródło, wyładowanie koronowe, czy fotojonizacja. Tworzą się wtedy jony zarówno badanych cząsteczek jak również gazu buforowego (np. powietrza). Powstała chmura jonów formowana jest przez potencjał elektryczny przyłożony do bramki (C) w paczkę (D) o określonych rozmiarach. Pod wpływem przyłożonego pola elektrostatycznego E chmura jonów zaczyna przesuwać się wzdłuż osi spektrometru. Natężenie pola wynosi ok.  $200 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Jego kierunek powoduje wstępne segregowanie jonów ujemnych (materiały wybuchowe) i dodatnich (narkotyki). W wyniku różnej ruchliwości poszczególne rodzaje jonów poruszają się z różną prędkością i do analizatora (F) docierają w różnym czasie (elementem analizującym jest zazwyczaj płytka Faradaya). Na podstawie korelacji sygnału (G) rejestrowanego przez detektor i czasu przelotu jonów wyznaczana jest ruchliwość analizowanych cząstek w oparciu o wzór

$$K = \left( \frac{3e}{16N} \right) \times \left( \frac{2\pi}{\mu k T_{eff}} \right)^{0,5} \times \left( \frac{1 + \alpha}{\Omega_D T_{eff}} \right) \quad (2)$$

gdzie:  $K$  - ruchliwość,  
 $e$  - ładunek elektronu,  
 $N$  - gęstość neutralnego gazu buforowego,  
 $\mu$  - zredukowana masa badanego jonu i gazu buforowego,  
 $T_{eff}$  - temperatura efektywna,  
 $\alpha$  - współczynnik korygujący,  
 $\Omega_D$  - efektywny przekrój czynny.

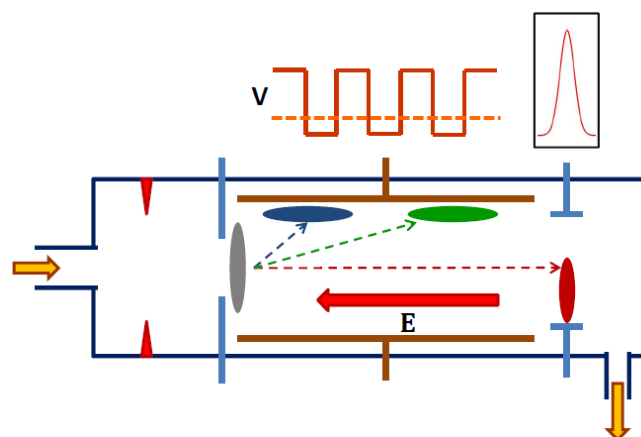
W polu stosowanym w tego rodzaju spektrometrze współczynnik  $\alpha$  wynosi ok. 0,02 i nie wpływa znacząco na ruchliwość. Ze względu na prowadzenie badań w różnych temperaturach i pod różnymi ciśnieniami bezpośrednie porównanie wyznaczonych ruchliwości nie jest miarodajne. Jednak po ich znormalizowaniu do standardowego ciśnienia 760 mm Hg oraz temperatury 273 K wyznaczone wg wzoru (3) ruchliwości zredukowane  $K_0$  są już dobrym parametrem jednoznacznie określającym cząsteczkę

$$K_0 = K \left( \frac{273}{T} \right) \cdot \left( \frac{p}{760} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $T$  - temperatura,  
 $p$  - ciśnienie,  
 w jakich prowadzony był pomiar.

W wyniku dalszego udoskonalenia budowy tego typu aparatury powstał spektrometr z asymetrycznym polem poprzecznym (*ang. field asymmetric ion mass spectrometer, FAIMS*). Dodatkowym elementem są elektrody ułożone równoległe do osi spektrometru (Rys. 2), do których przykładane jest impulsowe asymetryczne napięcie  $V$  generujące pole elektrostatyczne skierowane prostopadle do osi spektrometru o wysokim natężeniu ok.  $20000 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ . W tak silnych polach współczynnik  $\alpha$  staje się znaczący i istotnie modyfikuje wartość ruchliwości zredukowanej

$$K(E) = K_0 \cdot (1 + \alpha E) \quad (4)$$



Rys. 2. Schemat budowy spektrometru FAIMS.

Przy odpowiednim doborze czasu trwania i wielkości impulsów poprzecznego pola elektrycznego uzyskuje się odfiltrowanie niepożądanych jonów poprzez ich zubożenie wskutek zderzeń z dodatkowymi elektrodami. W konsekwencji do analizatora dociera mniejsza ilość jonów, co pozwala na lepsze rozróżnienie analizowanych cząstek, a tym samym na poprawę jakości analizy jonów.

### 3. PRZEGLĄD WYNIKÓW BADAŃ NIEKTÓRYCH SUBSTANCJI TECHNIKĄ IMS

Ze względu na istotne rozbieżności w ocenie występowania materiałów wybuchowych na wraku samolotu Tu-154M podjęta została analiza wyników badań materiałów wybuchowych, niektórych tworzyw sztucznych i alkoholi. Zostały one opublikowane w literaturze naukowej o zasięgu światowym przed katastrofą w Smoleńsku.

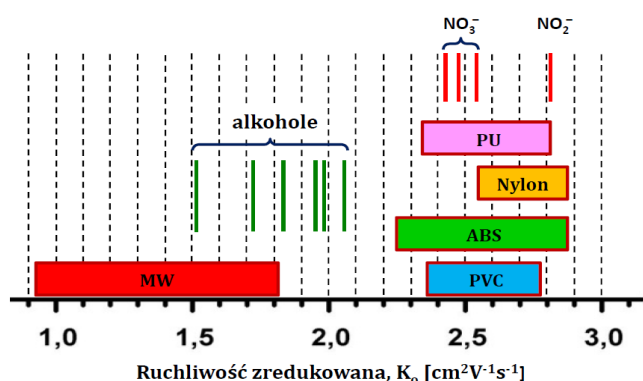
Ruchliwości najpowszechniej stosowanych materiałów wybuchowych (trotyl, nitrogliceryna, pentryt, nitroglikol, heksogen i oktogen) wahają się w przedziale od 0,9 do 1,8  $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  [1, 2]. Dodatkowy sygnał o wartości ok. 2,5 może pochodzić od grup nitrowych, także ulegających jonizacji. Jednak nie przyczynia się on do potencjalnego błędu odczytu sygnału pochodzącego od materiałów wybuchowych.

Powszechnie stosowane tworzywa sztuczne, takie jak: poliuretan, nylon ABS, czy polichlorek winylu charakteryzują się znacznie wyższymi ruchliwościami zredukowanymi. Zawierają się one w przedziale od 2,2 do 2,9 [3].

Trzecią grupą substancji poddanych analizie były alkohole [4]. Z mieszaniny alkoholi zawierających cząsteczki składające się od dwóch (etanol) do ośmiu atomów węgla (oktanol) zostały wyodrębnione wszystkie jej

składniki. Należy podkreślić, że ruchliwości badanej grupy alkoholi zawierały się w dość wąskim przedziale od 1,5 do 2,1. Technika IMS bez trudu rozróżniała nawet izomery 1-propanol i 2-propanol charakteryzujące się ruchliwościami odpowiednio 1,95 i 1,99.

Zestawienie analizowanych wyników przedstawiono na Rys. 3. Wyraźnie widać, że ruchliwości materiałów wybuchowych oraz powszechnie stosowanych tworzyw sztucznych istotnie różnią się między sobą. Przedziały ich ruchliwości są rozłączne, a przerwa rozdzielająca oba zbiory wynosi ponad 0,4. W kontekście wysokiej rozdzielczości metody udowodnionej w badaniach materiałów wybuchowych (przynajmniej 0,06 na poziomie 1,45) [2] czy alkoholi (przynajmniej 0,04 na poziomie 2) [4] nierozróżnienie przy pomocy spektroskopii ruchliwości jonów materiałów wybuchowych od tworzyw sztucznych jest bardzo mało prawdopodobne.



Rys. 3. Porównanie ruchliwości zredukowanych materiałów wybuchowych (MW), tworzyw sztucznych (poliuretanu (PU), nylonu, ABS i polichlorku winylu (PVC)) i alkoholi.

#### 4. ZASADY DETEKCYJ MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

Spektrometr FAIMS wykrywa wszelkie ślady, powstające w wyniku wzajemnego kontaktu powierzchni zawierających cząsteczki szukanego związku chemicznego. Osoby pragnące ukryć substancje wysokoenergetyczne nie mają dużej możliwości całkowitego wyeliminowania wydzielania zapachu przez materiał wybuchowy i tym samym usunięcia jego śladów. Podobna sytuacja ma miejsce również po ewentualnym wybuchu, gdyż w trakcie tego procesu praktycznie nigdy nie zostaną spalone całkowicie i zawsze pozostaną wykrywalne produkty rozpadu, a także resztki substancji wybuchowych umożliwiające ich wykrycie. Wyróżnić możemy bezpośrednią lub pośrednią drogę przenoszenia śladów materiałów wybuchowych. Droga bezpośrednia polega na skażeniu badanej powierzchni bezpośrednio poprzez kontakt z materiałem wybuchowym, pośrednia natomiast poprzez kontakt badanego przedmiotu lub wzajemny kontakt osób z których jedna miała bezpośrednią styczność z materiałami wybuchowymi np. dłonią osoby która wcześniej przenosiła materiały wybuchowe.

Najbardziej typowe miejsca występowania śladów to dłonie i wszelkie elementy mające z nimi kontakt – czyli klamki, suwaki, torby, elementy ubioru, które często dotykamy takie jak kieszonki, krawaty, włosy a nawet uszy i przedmioty często dotykane przez podejrzanego takie jak portfele i dokumenty tożsamości.

Urządzenia działające na zasadzie FAIMS są najczęściej stosowane w tych miejscach, w których trzeba szybko i dokładnie sprawdzić podejrzany element. Zazwyczaj znajdują zastosowanie w wojsku i obiektach podwyższonego ryzyka takich jak: obiekty publicznej administracji, portach, przejściach granicznych, jednostkach wspierających więzienia oraz oczywiście w środkach transportu, czyli pociągach, samolotach, statkach.

#### 5. PARAMETRY WPLYWAJĄCE NA WYKRYWALNOŚĆ MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

Ze względu na intensywność występowania ślady możemy podzielić na cztery podstawowe grupy:

- ślady zwykle  $10^{-2} \% - 10^{-8} \%$
- mikroślady  $10^{-9} \% - 10^{-11} \%$
- nanoślady  $10^{-12} \% - 10^{-14} \%$

i najmniejsze wykrywane już tylko za pomocą specjalistycznych metod:

- pikoślady  $10^{-15} \% - 10^{-17} \%$ .

Detekcja par materiałów wybuchowych polega na pobieraniu powietrza z nad próbką materiałów wybuchowych. Istotnym parametrem jest też prężność par, tzn. – wielkość określająca szybkość parowania substancji, umożliwiającą detekcję materiałów wybuchowych (Rys. 4).

Można wyodrębnić trzy podstawowe grupy substancji:

- z wysoką prężnością par (etylodinitroglukol EGDN, NG i dinitrotoluen DNT)
- średnią prężnością par (trotyl, azotan amonu – który jest też nawozem mineralnym i ma zastosowanie w rolnictwie, chemii gospodarczej i przemyśle spożywczym)
- niską prężnością par: PENTRYT, heksogen, oktogen)

Generalnie prężność par w dużej mierze zależy od temperatury i wilgotności powietrza. Jednak nie jest to prosta i jednoznaczna klasyfikacja. Ze wzrostem wilgotności może spadać poziom sygnału dla trotylu. Natomiast w przypadku nitrogliceryny sygnał wzrasta wraz ze spadkiem wilgotności.

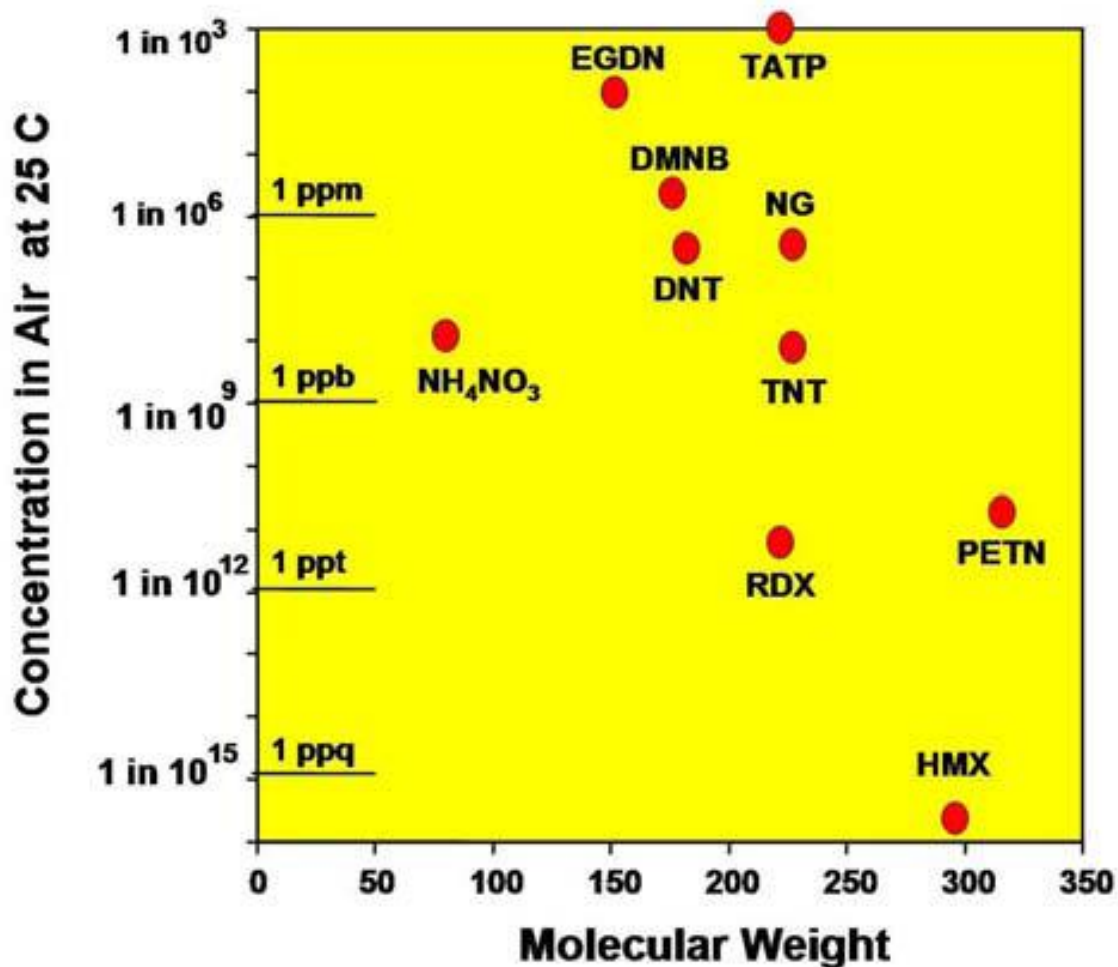
#### 6. DETEKCYJ MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH PRZY POMOCY URZĄDZENIA MO-2M

Detektor MO-2M (Rys. 5) jest aparatem wykorzystywanym do kontroli bagażu, odzieży paczek i innych elementów, w stosunku do których można mieć podejrzenie, że miały one styczność z materiałami wybuchowymi oraz do wykrywania materiałów wojskowych i przemysłowych.

Detektor wyposażony jest w źródła trytowe oraz system autokalibracji zapewniający stałe dostrojenie uwzględniające aktualne warunki prowadzenia pomiaru. Podczas pobrania próbki aparat zasysa pary z nad powierzchni badanego przedmiotu i bada ich skład w kanale analitycznym. W przypadku wykrycia śladów materiałów wybuchowych pojawia się alarm.

W oknie programu obsługującego urządzenie można wyróżnić 3 linie (Rys. 6) – linię poziomą tła oznaczoną kolorem zielonym, linię poziomu sygnału odniesienia (kolor niebieski) oraz linię alarmu (kolor czerwony).

W przypadku wyższej koncentracji materiałów wybuchowych pik będzie miał większą wysokość. Na tej podstawie nie można jednak określić dokładnej ilości

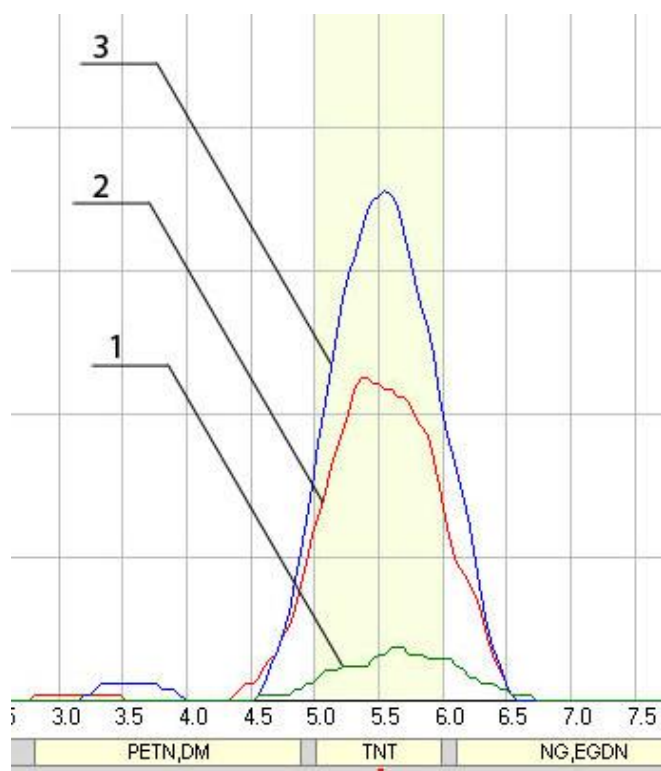


Rys. 4. Porównanie prężności par niektórych materiałów wybuchowych [5].



Rys. 5. Detektor MO-2M do badań skringingowych.





**Rys. 6.** Obraz jonogramów widziany przez operatora. Interwał tworzenia piku trwa około jednej sekundy. W przypadku wykrycia szukanej substancji wystąpi alarm. Wyniki badań przedstawia się za pomocą jonogramów.

materiałów wybuchowych a jedynie ich obecność. Stężenie par jest w dużej mierze zależne od warunków otoczenia, warunków przechowywania elementów z materiałami wybuchowymi, wilgotności względnej, w której przeprowadzane jest badanie, i odległości od badanego obiektu. Wielkość piku wskazuje jedynie na prawdopodobne stężenie par materiałów wybuchowych.

Pobrania próbek dokonuje się w sposób, który sprowadza się do wykonania szeregu ściśle określonych czynności w ustalonej kolejności. Czynności te ilustruje poniższy wykaz::

- uruchomić urządzenie w danym pomieszczeniu,
- skalibrować,
- sprawdzić poprawność odczytu przy pomocy przykładowego sygnału wkładu wzorcowego z naparowanym trotylem
- przybliżyć dyszę ssącą urządzenia do badanych ciał bądź elementów.

## 7. WYNIKI BADAŃ PRZEDMIOTÓW ZNALEZIONYCH NA MIEJSCU KATASTROFY W ŚMOLEŃSKU

W dniu 7.09.2013 r. przebadano detektorem MO-2M szereg przedmiotów należących do ofiar Katastrofy Śmoleńskiej, które zostały znalezione na wrakowisku pod Śmoleńskiem, a następnie w różnych okresach czasu przekazane zostały rodzinom ofiar. Wyniki tych badań przedstawiono w Tab. 1

Po przeprowadzeniu badań nie stwierdzono w sposób pewny obecności trotylu na badanych przedmiotach. Jedynie na płaszczu urządzenie jednoznacznie wskazało obecność nitrogliceryny oraz pentrytu, a na jednej z toreb obecność

nitrogliceryny. Ponieważ nitrogliceryna jest materiałem, który może mieć zastosowanie w przemyśle kosmetycznym

**Tab. 1.** Wyniki badań przedmiotów należących do ofiar Katastrofy Śmoleńskiej

L.p.	Przedmiot	Wynik badania
1	Zegarek	–
2	Pantofel damski lewy	wskazanie niejednoznaczne
3	Kamizelka	–
4	Pantofel damski prawy	–
5	Tasiemka	–
6	Poszycie fotela	–
7	Kosmetyczka i pantofle	–
8	Dokumenty	–
9	Nalepki	–
10	Torba z kosmetykami	–
11	Pudełko z monetami	–
12	Obrączka	–
13	Skarpety	–
14	Portfelik na wizytówki	–
15	Portfel	–
16	Banknoty i karty	–
17	Paszport	–
18	Płaszcz	–
19	Pasek do spodni	–
20	Bielizna	–
21	Koszulka	–
22	Rękawica	–
23	Spodnie	–
24	Krawat	–
25	Pudełko po monetach	–
26	Fragment paska	wskazanie niejednoznaczne
27	Fragment blaszany	–
28	Fragment blaszany	–
29	Fragment blaszany	–
30	Słoiczek z ziemią	–
31	Rurka Pitota	–
32	Fragment blaszany	–
33	Fragment blaszany	–
34	But damski prawy	–
35	But damski lewy	–
36	Torebka damska	–
37	Kłódka	–
38	Pokrywka od telefonu	–
39	Perła	–
40	Dokument papierowy	–
41	Rękawiczka	–
42	Rękawiczka męska	–
43	Buty męskie	–
44	Pasek	–
45	Koszula	–
46	Bielizna	–
47	Bielizna	–
48	Opaska	–
49	Krawat	–

**Tab. 2. Wyniki badań przedmiotów należących do ofiar Katastrofy Smoleńskiej cd.**

L.p.	Przedmiot	Wynik badania
50	Linka	–
51	Części metalowe	–
52	Ośłona półkolistą	–
53	Części metalowe 2	–
54	Fragment metalu	–
55	Listwa metalowa	–
56	Płaszcz	nitrogliceryna, pentryt
57	Torebka	–
58	Długopisy	–
59	Parasolka	–
60	Słuchawki	–
61	Portfel	–
62	Portfel	–
63	Beret	–
64	Torba	nitrogliceryna
65	Torba damska	–
66	Marynarka – kurtka	–
67	Buty	–
68	Koszula	–
69	Skarpetki	–
70	Pasek	–
71	But	–
72	Szarfa	–
73	Spodnie	–
74	Płaszcz	–

i farmaceutycznym, zaleca się przeprowadzenie dodatkowych badań dla tych elementów. W pozostałych dwóch przypadkach – na fragmencie paska oraz pantoflu damskim lewym stwierdzono wskazanie różnych materiałów wybuchowych, lecz ze względu na niejednoznaczny odczyt zaleca się dodatkowe badanie przy wykorzystaniu metod analitycznych.

Podczas kontrolnego pomiaru przeprowadzonego na kilkudziesięciu kosmetykach powszechnie dostępnych na rynku, sygnał charakterystyczny dla nitrogliceryny pojawił się w przypadku kremu do twarzy (w składzie tego kremu wymieniona była gliceryna) oraz fluidu o nieznanym składzie. Urządzenie nie włączyło alarmu podczas sprawdzania kilkunastu typów past do butów.

## 8. PODSUMOWANIE

- Spektrometria ruchliwości jonów IMS i FAIMS gwarantuje wysoką skuteczność jednoznacznego wykrywania jonów określonych materiałów wybuchowych w gazach zawierających ich opary.
- Metoda FAIMS charakteryzuje się wyższą rozdzielczością i czułością niż metoda IMS.
- Urządzenie MO-2M zapewnia wykrywanie i identyfikację wybranych materiałów wybuchowych w przypadku obecności ich oparów w analizowanym powietrzu.
- Porównanie ruchliwości zredukowanych materiałów wybuchowych oraz niektórych tworzyw sztucznych będących w powszechnym użyciu eliminuje możliwość ich nierozróżnienia przy zastosowaniu techniki IMS/FAIMS. Falszywego sygnału typowego dla TNT nie zarejestrowano w czasie testowych pomiarów przeprowadzonych na pastach do butów oraz kosmetykach.
- Przeprowadzone badania przedmiotów, które towarzyszyły ofiarom katastrofy smoleńskiej potwierdziły jednoznacznie obecność jonów nitrogliceryny oraz pentrytu w przypadku kilku przedmiotów spośród 74 przebadanych. W żadnym z przedmiotów nie wykryto obecności TNT.
- Obecność śladów materiałów wybuchowych na badanych przedmiotach może, ale nie musi potwierdzać faktu wybuchu w czasie katastrofy smoleńskiej.
- Niepodważalnym świadectwem ewentualnego wybuchu w czasie katastrofy smoleńskiej byłaby stwierdzona obecność produktów powybuchowych, niemożliwych do wykrycia za pomocą spektrometrów IMS i FAIMS.

## Literatura cytowana

- [1] R.G. Ewing et al., *Talanta* **54** (2001) 515.
- [2] H. Koyuncu et al., *Turk. J. Chem.* **29** (2005) 255.
- [3] M. Simpson et al., *Analyst* **118** (1993) 1293.
- [4] H.Y. Han et al., *J. Environ. Sci.* **19** (2007) 751.
- [5] L. Theisan et al., *Survey of Commercially Available Explosive Detection Technologies and Equipment* **25** (2004)