

mgr inż. **Marzena Szczurek**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 02.03.2015;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 24.08.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2015;

## Nowoczesne metody wykrywania materiałów wybuchowych w służbie bezpieczeństwa publicznego

### Modern Methods of Detecting Explosive Materials in the Service of Public Safety

### Современные методы обнаружения взрывчатых материалов в службе общественной безопасности

#### ABSTRAKT

**Cel:** Wskazanie, że – spośród wielu metod wykrywania materiałów wybuchowych (MW) – spektrometria ruchliwości jonów może być jedną z najskuteczniejszych metod detekcji tych materiałów zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych.

**Projekt i metody:** Narzędzia i metody użyte w badaniach – w części badawczej przeprowadzono rejestrację widm ruchliwości jonów (ang. *drift time spectrum*) za pomocą spektrometru ruchliwości jonów oraz analizę skuteczności identyfikacji materiałów wybuchowych na podstawie serii wykonanych pomiarów.

**Wyniki:** W trakcie badań dokonano krytycznej analizy współczesnych metod wykrywania materiałów wybuchowych, tj. metod elektrochemicznych, chemiluminescencyjnych, optycznych, optoelektronicznych, biochemicznych oraz metod opartych na obrazowaniu terahercowym. Szczególną uwagę poświęcono spektrometrii ruchliwości jonów (ang. *ion mobility spectrometry*, IMS) oraz zbadaniu skuteczności wykrywania MW za pomocą urządzenia opartego o technikę analityczną IMS.

**Wnioski:** Zagrożenia wynikające z możliwości użycia materiałów wybuchowych przez podmioty godzące w bezpieczeństwo publiczne, np. przez organizacje terrorystyczne, skłaniają do poszukiwania skutecznych sposobów przeciwstawienia się tymże niebezpieczeństwom. Jednym z rozwiązań może być szerokie wykorzystanie metod umożliwiających szybkie wykrywanie materiałów wybuchowych w przestrzeni publicznej. Nie jest to zadanie proste, bowiem w praktyce można się spotkać ze stosowaniem wielu różnych materiałów, surowców oraz systemów detonacji urządzeń wybuchowych, w tym improwizowanych ładunków wybuchowych (ang. *improvised explosive devices* – IED). Użyte materiały wybuchowe mogą pochodzić z różnych źródeł. Obok klasycznych MW mogą zostać użyte materiały wykorzystywane w górnictwie lub mieszaniny wyprodukowane z powszechnie dostępnych substancji chemicznych. Metody chemii analitycznej wykorzystywane w detekcji materiałów wybuchowych są przydatne głównie w warunkach laboratoryjnych, bowiem opierają się przede wszystkim na wykorzystaniu stacjonarnej aparatury pomiarowej. Spektrometria ruchliwości jonów jest metodą bardziej uniwersalną. Ze względu na swoją specyfikę, tj. chemiczną jonizację pod ciśnieniem atmosferycznym, a tym samym możliwość uproszczenia konstrukcji, stwarza potencjalne możliwości zastosowania w różnych uwarunkowaniach.

**Słowa kluczowe:** materiały wybuchowe, spektrometria ruchliwości jonów, detekcja materiałów wybuchowych

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

#### ABSTRACT

**Aim:** Demonstrate that from the numerous methods of detecting explosive materials, ion-mobility spectrometry can be one of the most effective approaches for use in laboratory and field conditions.

**Methodology:** During research performed and recorded ion mobility spectra (drift time spectrum) with the aid of a spectrometer and conducted an effectiveness analysis of explosive material identification based on a series of performed measurements.

**Results:** A critical analysis of contemporary techniques for detecting explosive materials included: electrochemical methods, chemiluminescent, optical, optoelectronic, biochemical and methods based on terahertz imaging. Special attention was devoted to ion mobility spectrometry (IMS) and to the testing of effectiveness of the IMS analytical technique in the detection of explosive materials.

**Conclusions:** Threats associated with the potential use of explosives by groups endangering public security e.g. terrorist organizations, culminate in a search for effective ways to counteract such hazards. A solution may lie in a broad application of techniques, which facilitate

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa; marzena.szczurek90@gmail.com; /Military University of Technology in Warsaw, Poland;

quick detection of explosive materials in public areas. The task is not straightforward because in practice one may encounter the use of numerous materials and detonation systems, including Improvised Explosive Devices (IED). The explosives used may come from various sources. Apart from traditional explosives, materials used in mining as well as mixtures of generally available chemical substances may be used. Analytical chemistry techniques, for use in the detection of explosive materials are effective, mainly in laboratory conditions, because, in essence, the techniques make use of stationary measuring equipment. Ion Mobility Spectrometry is the most universal method. Because of its characteristics; chemical ionisation under atmospheric pressure and simplification of construction, provides a potential for application in diverse conditions.

**Keywords:** explosive materials, ion-mobility spectrometry, detection of explosive materials

**Type of article:** original scientific article

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Доказать, что среди многих методов обнаружения взрывчатых материалов спектрометрия подвижности ионов может быть одним из наиболее эффективных методов – как в лабораторных, так и в полевых условиях.

**Проект и методы:** Инструменты и методы, использованные в исследованиях: в исследовательской части статьи были зарегистрированы спектры подвижности ионов (анг. *drift time spectrum*) при помощи спектрометра подвижности ионов, а также сделан анализ эффективности выявления взрывчатых материалов на основе серии проведенных измерений.

**Результаты:** В ходе исследований был проведен критический анализ современных методов обнаружения взрывчатых материалов, которые включают: электрохимические, хемилюминесцентные, оптические, оптоэлектрические и биохимические методы, а также основанные на тергерцовом изображении. Особое внимание было уделено спектрометрии подвижности ионов (анг. Ion Mobility Spectrometry, IMS), а также исследованию эффективности обнаружения взрывчатых материалов благодаря устройству, основанному на аналитической методике IMS.

**Выводы:** Угрозы, связанные с возможностью использования взрывчатых материалов субъектами, которые могут нарушить общественную безопасность, например, террористическими организациями, ставят нас перед необходимостью поиска эффективных способов борьбы с угрозами. Одним из решений может быть широкое использование методов, позволяющих быстро обнаружить взрывчатые материалы в публичном пространстве. Это не простая задача, потому что на практике можно встретиться с использованием различных материалов, сырья и систем детонации взрывных устройств, в том числе импровизированных взрывных устройств (анг. Improvised Explosive Devices - IED). Используемые взрывчатые материалы могут быть разного происхождения. Вместе с классическими могут быть использованы материалы, принимаемые в горном деле либо составы, приготовленные из общедоступных химических веществ. Методы аналитической химии, используемые в обнаружении взрывчатых материалов, пригодны в основном в лабораторных условиях, так как они основаны прежде всего на использовании стационарной измерительной аппаратуры. Спектрометрия подвижности ионов является более универсальным методом. В связи с ее спецификой, т.е. химической ионизацией при атмосферическом давлении, и, таким образом, возможностью упрощения структуры, создает потенциальную возможность её применения в разных условиях.

**Ключевые слова:** взрывчатые материалы, спектрометрия подвижности ионов, обнаружение взрывчатых материалов

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

## 1. Wprowadzenie

Współczesna rzeczywistość stawia przed służbami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo coraz większe oczekiwania, które trudno byłoby spełnić bez wykorzystania najnowszych zdobyczy nauki i techniki. Wzrost wymagań wobec jakości wyposażenia wprowadzanego do służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo publiczne ma charakter ciągły. Wynika to ze zmian zachodzących w środowisku bezpieczeństwa, gdzie pojawiają się nowe zagrożenia, w tym m.in. coraz to nowsze i bardziej wyszukane formy ataków terrorystycznych. Implikuje to potrzebę dywersyfikacji rozwiązań w obszarze przeciwdziałania tym niebezpieczeństwom.

W kontekście zadań służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo, w tym za zwalczanie terroryzmu, przestępczości kryminalnej i narkotykowej oraz unieszkodliwianie ładunków wybuchowych przez pododdziały antyterrorystyczne policji, zasadne wydaje się przeprowadzenie oceny dotychczasowych możliwości i wskazanie najbardziej efektywnych

metod wykrywania materiałów wybuchowych<sup>2</sup>. Należy przy tym pamiętać, że wykrywanie klasycznych i improwizowanych ładunków wybuchowych możemy ogólnie podzielić na: 1) metody sprowadzające się do wykrywania broni i ładunków/urządzeń ukrytych w środkach transportu, bagażach i ubraniach (ang. *bulk detection*); oparte są one przede wszystkim na prześwietlaniu obiektów promieniowaniem gamma, X lub neutronowym; 2) metody bazujące na detekcji par materiałów wybuchowych (ang. *vapour detection*), ewentualnie śladów MW osadzonych na przedmiotach, ubraniach, czy dłoniach; przykładami takich metod są chromatografia gazowa, spektrometria mas, spektrometria ruchliwości jonów [1].

Ogólnie rzecz biorąc, metody wykrywania materiałów wybuchowych opierają się na zbadaniu ściśle określonych właściwości fizykochemicznych MW przy użyciu odpowiedniego typu czujnika. Należy jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że szereg metod wykrywania materiałów

<sup>2</sup> Warto dodać, że niektóre z tych metod służą również wykrywaniu toksycznych środków przemysłowych, bojowych środków trujących, a także środków odurzających (narkotyków).

wybuchowych polega na wykryciu urządzenia potencjalnie zawierającego tenże materiał, a nie samego materiału wybuchowego.

## 2. Charakterystyka wybranych metod wykrywania materiałów wybuchowych

Metody wykrywania materiałów wybuchowych mogą być klasyfikowane z uwzględnieniem zjawisk fizycznych i fizykochemicznych wykorzystywanych w analizie. W tym przypadku można wymienić między innymi metody: elektrochemiczne, biochemiczne, chemiluminescencyjne i optyczne, a także obrazowanie terahercowe. Szeroko stosowana jest także spektrometria mas oraz spektrometria ruchliwości jonów.

Metody elektrochemiczne oparte są na przemianach elektrochemicznych (reakcjach redoks), w których biorą udział wykrywane substancje [2]. Próbkę ulega przemianom elektrochemicznym, podczas których generowany jest mierzalny sygnał analityczny. Sensorami zbierającymi informacje mogą być elektrody (inercyjne, kulometryczne, konduktometryczne, potencjometryczne). Szczególną uwagę zwraca detektor woltamperometryczny wykorzystywany w technice woltamperometrii ukierunkowanej na wykrywanie materiałów wybuchowych [3–4].

Metody chemiluminescencyjne opierają się na zjawisku chemicznej luminescencji. Pod wpływem reakcji chemicznych w kontrolowanym środowisku dochodzi do emisji fal świetlnych, generacji błysków świetlnych. Poprzez fotoanalizę parametrów emitowanego światła (długości fali) w funkcji czasu, możliwa staje się identyfikacja produktów reakcji charakterystycznych dla materiałów wybuchowych. Zaletą tej metody jest brak źródła promieniowania [3].

Metody optyczne oparte są na wykorzystywaniu zmiany parametrów strumienia świetlnego przechodzącego przez badany ośrodek mogący potencjalnie zawierać materiał wybuchowy. Metody te klasyfikuje się ze względu na długość fali użytego promieniowania. Można wyróżnić metody optyczne wykorzystujące promieniowanie widzialne i ultrafioletowe (UV-VIS) oraz zakres podczerwieni (IR) [2].

Metody optoelektroniczne odgrywają ważną rolę w wykrywaniu par materiałów wybuchowych. Wykorzystuje się zdalne wykrywanie substancji albo wymagane jest pobranie próbki. Metody te bazują na zjawiskach emisji bądź absorpcji promieniowania elektromagnetycznego przez produkty gazowe (tlenki azotu) powstałe podczas samoistnego lub wymuszonego termicznie rozpadu (dekompozycja). Podstawową stosowaną techniką jest tzw. technika CEAS (ang. *Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy*) [5–6]. Technika ta charakteryzuje się wysoką czułością detekcji gazów. Opiera się na wprowadzeniu (pozaosiowym) wiązki promieniowania lasera do optycznej wnęki. Stosowane wnęki często zbudowane są z dwóch wklęsłych zwierciadeł o dużym współczynniku odbicia.

Metody biochemiczne – są to metody wykorzystujące do wytworzenia sygnału analitycznego materiały aktywne biologicznie i biochemicznie. Element aktywny biosensora to różnorodny materiał biologiczny (białka, enzymy, antyciała, antygeny). Jest on połączony z przetwornikiem

sygnału analitycznego (układem elektronicznym). Istnieje możliwość wykorzystania matrycy takich sensorów oraz algorytmów sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji sygnałów analitycznych. Pozwala to na opracowanie tzw. „sztucznego nosa” – inteligentnego urządzenia przeznaczonego do wykrywania materiałów wybuchowych [7–8].

Metoda obrazowania terahercowego wykorzystuje nieszkodliwe dla żywych organizmów promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości od 0,1 do 10 THz (długość fali od 3 [mm] do 30 [μm]) [2]. Fale promieniowania przenikają przez nieprzezroczyste przedmioty i są skupiane, tworząc przy tym obraz wszystkiego, co stało im na drodze. Jest to praca w trybie transmisyjnym. Stosowany jest również odbiciowy tryb pracy. Metoda terahercowa stanowi alternatywę w stosunku do metod wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie bądź gamma [1].

Metody spektrometryczne (spektrometria mas) opierają się na jonizacji cząsteczek i następnie określaniu ilorazu masy do ładunków ( $m/z$ ) powstających jonów. Typowy układ wyposażony jest w źródło jonizacji cząsteczek oraz separatory produktów jonizacji, pod względem wcześniej wspomnianego ilorazu masy do ładunków. Detekcja spowodowana jest odchyleniem strumienia jonów badanej substancji w polu elektrycznym, a formowany sygnał analityczny jest przetwarzany w postaci widma mas. Zaletą metody jest jej wysoka czułość [9].

Należy zaznaczyć, że w spektrometrii mas, jonizacja próbki oraz analiza powstałych produktów odbywają się w próżni. Zapewnienie takich warunków wymaga zastosowania skomplikowanej i kosztownej aparatury. Alternatywną metodą do wyżej wymienionej, może być spektrometria ruchliwości jonów.

## 3. Spektrometria ruchliwości jonów

Spektrometria ruchliwości jonów jest metodą wykorzystywaną do wykrywania substancji powstających w wyniku reakcji jonowo-cząsteczkowych. Podczas niej rejestrowana jest obecność stabilnych jonów. Substancjami, które można wykryć, mogą być pary toksycznych środków przemysłowych, bojowych środków trujących, środków odurzających oraz, co najważniejsze, materiałów wybuchowych. Idea metody polega na rozdzieleniu produktów wyżej wspomnianych reakcji w polu elektrycznym, pod względem ruchliwości, będącej składową steryczności cząsteczek, ładunku i masy. W metodzie IMS, przy detekcji powstałych jonów, stosowana jest łagodna, chemiczna metoda jonizacji (lub fotojonizacja) pod ciśnieniem atmosferycznym [10].

### 3.1. Budowa klasycznego spektrometru ruchliwości jonów

Klasyczny spektrometr ruchliwości jonów posiada geometrię cylindryczną i podzielony jest na części: reakcyjną i dryftową. Są one oddzielone od siebie siatką dozującą, stanowiącą tzw. zawór elektryczny. W części reakcyjnej, w wyniku jonizacji pierwotnej, powstają jony reakcyjne. Najczęściej źródłem jonizacji jest izotop promieniotwórczy Ni-63 będący emitorem cząstek beta. Z chwilą pojawienia się analitu, w gazie nośnym zachodzi szereg reakcji jonowo-cząsteczkowych, a ich produkty cyklicznie wprowadzane

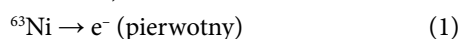
są poprzez siatkę dozującą do obszaru dryftowego, gdzie następuje ich rozdział pod względem ruchliwości w polu elektrycznym ukształtowanych przez układ elektrod znajdujących się na różnych potencjałach. Rozdzielone produkty reakcji jonowo-cząsteczkowych docierają następnie do elektrody zbiorczej, gdzie rozładowując się indukują sygnał analityczny w obwodzie zewnętrznym spektrometru. W efekcie rejestrowane jest tzw. widmo ruchliwości jonów [11].

Występowanie w widmie charakterystycznych pików związane jest z obecnością analitu, co szerzej zostanie omówione w dalszej części artykułu. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że w zależności od „natury” chemicznej badanej substancji, w wyniku zachodzących reakcji jonowo-cząsteczkowych, mogą powstawać jony dodatnie lub jony ujemne. Mówi się wówczas powszechnie o analizie w trybie dodatnim lub ujemnym. Sprowadza się to do odpowiedniej polaryzacji elektrod spektrometru. Widmo ruchliwości jonów jest źródłem informacji zarówno jakościowej, jak i ilościowej. Badany związek chemiczny identyfikuje się za pomocą czasu dryftu (położenia pików), natomiast jego stężenie określa się na podstawie powierzchni pików obserwowanych w widmie (wynikającej z ładunku niesionego przez jony).

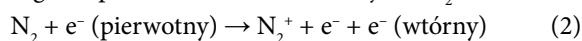
Należy wspomnieć, że poza wyżej opisanym „klasycznym” spektrometrem ruchliwości jonów, istnieje szereg rozwiązań alternatywnych. Należą do nich między innymi: 1) spektrometry typu FAIMS (ang. *Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometer*) – spektrometry z silnym asymetrycznym polem elektrycznym, 2) spektrometry aspiracyjne, 3) spektrometry z transformacją Fouriera (ang. FTIMS – *Fourier Transform Ion Mobility Spectrometry*) [11]. Technika IMS może również wchodzić w skład technik połączonych, np. połączenie chromatografii gazowej ze spektrometrią ruchliwości jonów.

### 3.2. Reakcje jonowo-cząsteczkowe

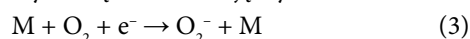
Typowym źródłem jonizacji stosowanym w spektrometrii ruchliwości jonów jest izotop Ni-63, będący emitentem cząstek beta (elektronów):



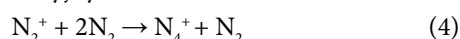
Emitowany elektron oddziałując z cząsteczką azotu gazu nośnego, doprowadza do utworzenia jonu  $\text{N}_2^+$ :



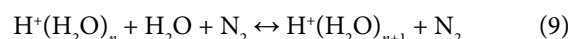
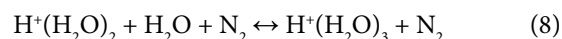
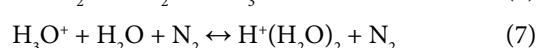
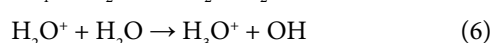
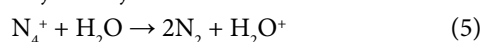
Możliwe jest też utworzenie jonów tlenu cząsteczkowego w obecności innych cząsteczek obojętnych M:



Jony:  $\text{N}_2^+$  oraz  $\text{O}_2^-$  biorą udział w kolejnym etapie tworzenia jonów reakcyjnych

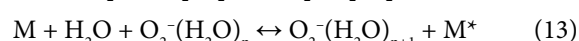
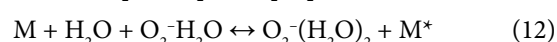
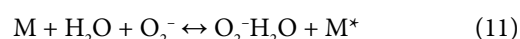
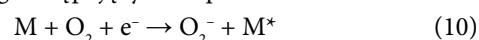


Powstający w reakcji (4) jon oddziałuje z obojętnymi cząsteczkami zawartymi w gazie nośnym według następującej sekwencji reakcji:

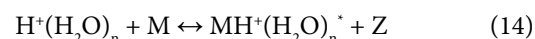


Powyższy proces w literaturze określa się jako „jonizację chemiczną pod ciśnieniem atmosferycznym” (ang. APCI – *Atmospheric Pressure Chemical Ionization*). Należy jednak zaznaczyć, że o końcowym produkcie powyższych reakcji decydują: 1) skład gazu nośnego, 2) temperatura, wilgotność, ciśnienie, koncentracja cząsteczek, 3) wartość pola elektrycznego w sekcji reakcyjnej IMS [11].

Reakcje od (5) do (9) dotyczą tworzenia dodatnich jonów reakcyjnych. Tworzenie ujemnych jonów reakcyjnych rozpoczyna się od wyżej wymienionej reakcji (2) i przebiegać może według następujących etapów:

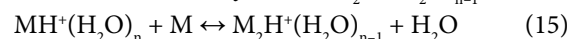


M stanowiąc mogą cząsteczki:  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ . Zarówno w przypadku dodatnich, jak i ujemnych jonów reakcyjnych, wartość  $n$  zależy od temperatury i wilgotności. Wartość  $n$  rośnie ze wzrostem wilgotności, a maleje ze wzrostem temperatury. Cząsteczki analitu M, wprowadzane do części reakcyjnej, zderzają się z jonami reakcyjnymi. W obecności innej obojętnej cząsteczki Z (np.  $\text{N}_2$ ) zachodzi reakcja (14) prowadząca do podstawowego produktu obserwowanego w widmie ruchliwości jonów, tzw. protonowanego monomeru.



Reakcja (14) jest dominującym sposobem tworzenia dodatnich jonów próbki, w których protonowany monomer tworzony jest przez połączenie lub przeniesienie protonu do cząsteczki analitu.

Przy odpowiednio dużej koncentracji badanej substancji, do monomeru może być przyłączona dodatkowa cząsteczka analitu, tworząc dimer  $\text{M}_2\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_{n-1}$ :



Wraz ze wzrostem stężenia analitu następuje „zużywanie” jonów reakcyjnych. Dalsze zwiększanie stężenia analitu skutkuje, że zaczyna dominować reakcja (15), kosztem reakcji (14), przy dalszym zaniku koncentracji jonów reakcyjnych.

### 3.3. Identyfikacja i oznaczanie substancji

Położenie maksimum pików w widmie ruchliwości wskazuje na czas dryftu określonego rodzaju jonów. Na podstawie tejsze wielkości możemy określić ruchliwość  $K$  (współczynnik ruchliwości) oraz ruchliwość zredukowaną.

$$K = \frac{A}{\left(t_d - 0,5 \cdot \frac{t_g}{1000}\right) \cdot HV} \quad (16)$$

gdzie:

$A$  – stała spektrometru [ $\text{cm}^2$ ],

$t_d$  – czas dryftu danego jonu [ms],

$t_g$  – czas otwarcia siatki dozującej [ $\mu\text{s}$ ],

$HV$  – napięcie zasilania [kV].

Wartość ruchliwości zredukowanej  $K_0$  odnosi się do warunków standardowych według następującej zależności [11]:

$$K_0 = K \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760} \quad (17)$$

gdzie:

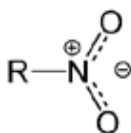
$T$  – temperatura detektora [K]

$p$  – ciśnienie [mm Hg]

Wyznaczona wartość ruchliwości zredukowanej pozwala identyfikować substancje na podstawie istniejących baz danych. Powierzchnia pików w rejestrowanym widmie ruchliwości jonów bezpośrednio związana jest z ładunkiem niesionym przez poszczególne rodzaje jonów. Biorąc pod uwagę przebieg reakcji jonowo-cząsteczkowych między jonami reakcyjnymi a cząsteczkami analitu prowadzącymi do utworzenia monomeru i dimeru, możliwe jest ustalenie stężenia badanego związku. W aspekcie praktycznym wymaga to sporządzenia tzw. krzywych kalibracyjnych, na podstawie szeregu widm ruchliwości jonów zarejestrowanych przy różnych stężeniach analitu.

#### 4. Zastosowanie spektrometrii ruchliwości jonów w wykrywaniu materiałów wybuchowych

Materiały wybuchowe są to związki metastabilne, zdolne do samopodtrzymujących się, silnie egzoenergetycznych reakcji, których wynikiem są produkty gazowe. „Wybuchowość” materiałów warunkowana jest przez wiązania zwane eksploforami (Vant’ Hoff). Materiały wybuchowe, które znajdują praktyczne zastosowanie, to przede wszystkim związki nitrowe [12]. Grupa nitrowa ( $-\text{NO}_2$ ) jest to jedna z grup posiadająca bardzo silne własności elektrofilowe. Większość materiałów wybuchowych są to związki wielonitrowe, stanowiące silne elektronoakceptory. Właściwość ta jest spowodowana silnym deficytem ładunku ujemnego występującym przy atomie azotu. W budowie grupy nitrowej występują dwa równie, co do długości, silnie spolaryzowane wiązania między azotem a tlenem. Budowę grupy nitrowej można opisać za pomocą dwóch struktur mezomerycznych, zaś formą rzeczywistą jest hybryda tych struktur (rycina 1).



Ryc. 1. Usredniona struktura rezonansowa grupy nitrowej [13]  
Fig. 1. The average resonance structure of the nitro group [13]

Związki wielonitrowe stosunkowo łatwo odszczepiają cząsteczkę ditlenku azotu ( $\text{NO}_2$ ). Skutkuje to utworzeniem karboanionu bądź rodnika karbonylowego. W zależności od budowy związku, a dokładniej sposobu wiązania związku z grupą nitrową, występuje podział na związki: C-nitrozwiązki, O-nitrozwiązki, N-nitrozwiązki. W nitrozwiązkach występuje grupa nitrowa połączona

bezpośrednio z atomem węgla. Występują grupy funkcyjne, takie jak azotanowa ( $-\text{ONO}_2$ ) w nitroestrach i nitroaminowa ( $-\text{NNO}_2$ ), w nitroaminach.

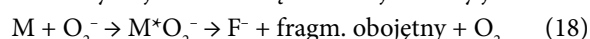
Materiały wybuchowe, ze względu na swoją budowę, wykazują silną elektroujemność. W wyniku jonizacji tworzą się więc głównie jony ujemne, których analiza odbywać się będzie przy polaryzacji ujemnej. W przypadku substancji wybuchowych, które nie zawierają grup elektroujemnych, takie jak cząsteczki TATP, stosowniejsze jest zastosowanie polaryzacji dodatniej. Pożądane jest takie postępowanie, szczególnie gdy produkty jonizacji mają tendencję do tworzenia aduktów z odpowiednimi odczynnikami. Materiały wybuchowe mogą być wykryte za pomocą rejestracji aduktu jonu z kationem  $\text{NH}_4^+$  [14].

#### 4.1. Reakcje jonowo-cząsteczkowe możliwe przy analizie nitrozwiązków

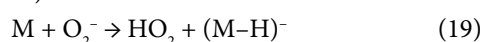
Większość materiałów wybuchowych należy do grupy nitrozwiązków, które charakteryzują się silną elektroujemnością. W wyniku jonizacji chemicznej pod ciśnieniem atmosferycznym tworzyć będą one jony ujemne. Ich analiza za pomocą IMS odbywać się będzie przy polaryzacji ujemnej. Wówczas podstawowym jonem reakcyjnym jest  $\text{O}_2^-$ , hydratowany w zależności od zawartości pary wodnej w gazie reakcyjnym. W przypadku domieszkowania gazu reakcyjnego powstawać mogą alternatywne jony, takie jak:  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  [4].

W przypadku analizy materiałów wybuchowych w trybie ujemnym za pomocą IMS należy rozpatrzyć między innymi [15]:

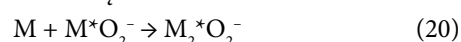
- a) reakcje z przeniesieniem ładunku między cząsteczką próbki  $M$  a jonem reakcyjnym  $\text{O}_2^-$ ; produkt reakcji może dysocjować tworząc bardziej stabilny jon  $F^-$ :



- b) reakcje z przeniesieniem protonu między cząsteczką analitu a jonem reakcyjnym, prowadzące do utworzenia jonu ( $M-H$ ) $^-$ :



- c) reakcje dimeryzacji i klasteryzacji nabierające znaczenia wraz ze wzrostem stężenia analitu:



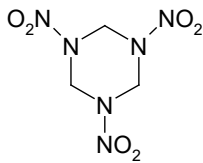
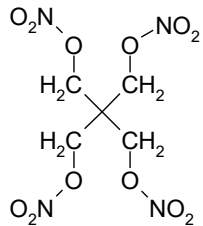
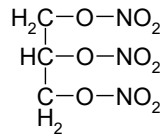
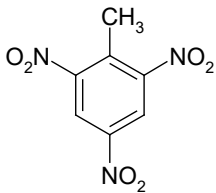
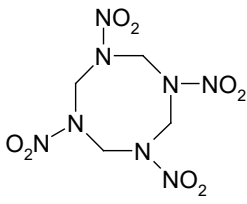
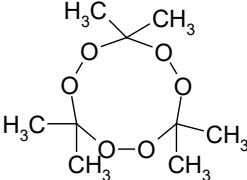
W konsekwencji, w przypadku analizy materiałów wybuchowych, można spodziewać się następujących produktów jonowych powstających z podstawowego jonu wyjściowego  $M \cdot \text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_2^-$ :

- jonu cząsteczkowego:  $M \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,
- adduktu z jonem  $\text{O}_2^-$ :  $M \cdot \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,
- jonu po odszczepieniu protonu:  $(M-1)^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,
- jonu nitroniowego:  $\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

#### 4.2. Prężność par materiałów wybuchowych

W detekcji materiałów wybuchowych, poza właściwościami chemicznymi, decydujące znaczenie będą mieć ich wybrane właściwości fizyczne. Będzie to przede wszystkim prężność par. W tabeli 1 zawarto wartości prężności par wybranych materiałów wybuchowych.

**Tabela 1.** Wybrane materiały wybuchowe i ich prężność par [opracowanie własne na podstawie [13]]  
**Table 1.** Selected explosives and their vapour pressure [own elaboration on the basis of [13]]

Materiał wybuchowy / Explosive	Numer CAS / CAS number	Wzór strukturalny / Structural formula	Wzór sumaryczny / Molecular formula	Prężność par / Vapour pressure [mmHg]
Heksogen (RDX) 1,3,5- tri nitro-1,3,5-triazacykloheksan / Hexogen (RDX) Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine	121-82-4		$C_3H_6N_6O_6$	$4.1 \times 10^{-9}$
Pentryt (PETN) tetraazotan (V) tetrahydroksymetylometanu / Penthrite (PETN) Pentaerythritol tetranitrate	1978-11-05		$C_5H_8N_4O_{12}$	$3.8 \times 10^{-10}$
Nitrogliceryna (NG) triazotan 1,2,3-propanotriolu / Nitroglycerin (NG) 1,3-dinitrooxypropan-2-yl nitrate	55-63-0		$C_3H_5N_3O_9$	$2.6 \times 10^{-6}$
Trinitrotoluen (TNT) 2-metylo-1,3,5-trinitrobenzen / Trinitrotoluene (TNT) 2-methyl-1,3,5-trinitrobenzene	118-96-7		$C_7H_5N_3O_6$	$1.1 \times 10^{-6}$
Oktogen (HMX) 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyklooktan / Octogen (HMX) 1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraazocane	2691-41-0		$C_4H_8N_8O_8$	$3.3 \times 10^{-14}$
trinadtlenek triacetonu (TATP) 3,3,6,6,9,9-heksametylo-1,2,4,5,7,8-heksaoksycyklononan / triacetone triperoxide (TATP) 3,3,6,6,9,9-Hexamethyl-1,2,4,, 7,8-tetraoxacyclononane	17088-37-8		$C_9H_{18}O_6$	$5.21 \times 10^{-2}$

Biorąc pod uwagę zawarte wyżej dane (wartości prężności par), należy spodziewać się, że nitrogliceryna i trinitrotoluen są bardziej lotnymi związkami i będą znacznie łatwiej wykrywane technikami wykorzystującymi analizę par, niż oktogen, pentryt i heksogen. Wyjątkowo wysoką prężność par posiada trinadtlenek triacetonu, którego wybuchowość warunkuje obecność mostków tlenowych.

## 5. Część badawcza

Część badawcza obejmowała szereg czynności przygotowawczych, doświadczalnych i obliczeniowych, z których za najistotniejsze można uznać:

- przygotowanie próbek materiałów wybuchowych,

- rejestrację widm ruchliwości jonów za pomocą komercyjnego spektrometru,
- analizę skuteczności identyfikacji materiałów wybuchowych na podstawie serii wykonanych pomiarów.

### 5.1. Opis przyrządu pomiarowego

W badaniach użyto komercyjnego spektrometru ruchliwości jonów IONSCAN 500DT firmy Smiths Detection. Spektrometr ten jest urządzeniem stacjonarnym i przeznaczony jest do wykrywania materiałów wybuchowych i narkotyków. W tabeli 2 wymieniono podstawowe substancje wykrywane przez wspomniany spektrometr, a które standardowo definiowane są przez producenta w bibliotece widm.

**Tabela 2.** Wykaz podstawowych substancji wykrywanych przez spektrometr IONSCAN 500DT [16]**Table 2.** A list of basic substances detected by spectrometer IONSCAN 500DT [16]

Grupa substancji / Substance group	Nazwa substancji / Substance name
Materiały wybuchowe / Explosives	Azotan amonu / Ammonium nitrate NG (Nitrogliceryna) / (Nitroglycerin) PETN (Pentaerytrytol) / (Pentaerythritol) RDX (Heksogen i cyklonit) / (Hexogen and cyclonite) Tetryl / TNT (Trinitrotoluen) (Trinitrotoluene) HMTD TATP
Narkotyki / Drugs	Amfetamina / Amphetamine Heroina (Diacetylmorfina) / Heroin (Diacetylmorphine) MDA (Metylo-dioksy amfetamina) / (Methylenedioxyamphetamine) MDEA (Metylo-dioksy etyloamfetamina) / (Methylenedioxyethylamphetamine) MDMA (Metylo-dioksy metaamfetamina) / (Methylenedioxyamphetamine) Metaamfetamina / Metamphetamine THC (Tetrahydrokannabinol) / (Tetrahydrocannabinol)

Urządzenie wyposażone jest w dwie komory ruchliwości jonów pracujące jednocześnie. Jedna z nich pracuje w trybie dodatnim (analiza jonów dodatnich), natomiast druga w trybie ujemnych (analiza jonów ujemnych). Źródłem jonizacji jest izotop Ni-63. Podstawowe parametry pracy spektrometru przedstawiają się następująco:

- źródło jonizacji: Ni-63;
- temperatura pracy komory analizującej jony dodatnie: 220 [°C];
- temperatura pracy komory analizującej jony ujemne: 115 [°C];
- temperatura pracy termodesorbera: 205 [°C];
- napięcie zasilania komory analizującej jony dodatnie: 1600 [V];
- napięcie zasilania komory analizującej jony ujemne: 1800 [V].

Wyżej wymienione parametry można kontrolować w odpowiednim panelu sterowania. Możliwy jest bieżący podgląd na aktualne widmo ruchliwości jonów.

Spektrometr wyposażony jest w termodesorber. Analizowaną próbkę stanowi wymaz z badanych powierzchni zbierany za pomocą specjalnego próbnika, w którym umieszcza się bibułę jednorazowego użytku. Po zebraniu wymazu bibuła umieszczana jest w termodesorberze, następuje jej krótkotrwałe podgrzanie, a po tym podanie par substancji do układu analitycznego spektrometru. Widmo ruchliwości jonów wyznaczane jest na podstawie 24 skanów realizowanych podczas termodesorpcji.

Należy zaznaczyć, że wynik analizy (obecność danej substancji w próbce) sygnalizowany jest przez urządzenie z określonym prawdopodobieństwem, podawanym w procentach. Ponadto, oprogramowanie umożliwi użytkownikowi definiowanie nowych substancji, których widma nie są umieszczone w bibliotece widm dostarczanych przez producenta.

## 5.2. Próbkki materiałów wybuchowych

W ramach przewidzianych pomiarów przygotowano próbki następujących materiałów wybuchowych:

- trotylu (2,4,6-trinitrotoluen, TNT),
- tetrylu (2,4,6-trinitrofenylo-N-metylonitroamina, TNM),

- pentrytu (tetraazotan(V) tetrahydroksymetylometanu, PETN),
- oktogenu (1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyklooktan, HMX),
- heksogenu (1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacykloheksan, RDX),
- NTO ((3-nitro-1,2,4-triazol-5-on, NTO),
- FOX-7 (1,1-diamino-2,2-dinitroeten, DADNE).

Próbki powyższych materiałów wybuchowych zostały przygotowane w dwóch postaciach: 1) jako materiał stały o masie 1 [g] umieszczony w fiolce zamkniętej septą silikonową; 2) jako roztwór ciekły w acetonie o stężeniu 1 [µg/ml] oraz o stężeniu 10 [µg/ml].

Pierwsze z próbek przeznaczone były do badania skuteczności aparatury do detekcji materiałów wybuchowych. Zostały zebrane jako wymaz z materiału osłonowego zawierającego drobiny (pary) takich substancji. Analiza odbyła się przy użyciu wcześniej opisanego spektrometru ruchliwości jonów.

Próbki w postaci roztworów ciekłych o objętości 5 [µl] były natomiast nastrzykiwane za pomocą mikrostrzykawki bezpośrednio na bibułę próbnika. W przypadku każdego z pomiarów, bibuła była umieszczana w termodesorberze po 10 minutach od nastrzyknięcia roztworu materiału wybuchowego. Czas ten został arbitralnie przyjęty jako konieczny do odparowania rozpuszczalnika.

## 5.3. Widma ruchliwości jonów wybranych materiałów wybuchowych

Widma ruchliwości jonów wybranych materiałów wybuchowych, a w szczególności widma ruchliwości jonów ujemnych użytych w badaniach materiałów wybuchowych, charakteryzowały się określonymi cechami. Uwagę zwraca fakt znacznie bardziej skomplikowanej struktury widm w stosunku do typowych widm ruchliwości jonów dodatnich rejestrowanych podczas analizy innych substancji niebezpiecznych, np. takich jak bojowe środki trujące bądź pestycydy.

Poza obserwowanym pikiem identyfikowanym z wykrywanym materiałem wybuchowym w widmie ruchliwości jonów występuje również pik tzw. kalibrantu oraz pik (piki) tlenków azotu.

Pierwszy z nich związany jest z obecnością dozowanej do gazu nośnego substancji kalibrującej, a położenie związanego z nią piksu pozwala automatycznie weryfikować stabilność pracy spektrometru. Natomiast obecność tlenków azotu związana jest z termicznym rozkładem materiałów wybuchowych podczas termodesorpcji.

Struktura obserwowanych widm dla różnych rodzajów próbek tego samego rodzaju materiału wybuchowego była podobna. Różnice występowały w powierzchni pików, co związane było z różnym stężeniem analitu w próbce.

#### 5.4. Ocena skuteczności wykrywania materiałów wybuchowych za pomocą użytego przyrządu

W celu oceny skuteczności identyfikacji poszczególnych materiałów wybuchowych przeprowadzono serię pomiarów

dla każdego z nich oraz dla każdej postaci próbki. W seriach przeprowadzono po dwadzieścia pomiarów. Łącznie wykonano ich 420. Pewność identyfikacji danego analitu była określana przez urządzenie jako prawdopodobieństwo jego wystąpienia (wyrażonego w procentach) powyżej tzw. progu alarmowego. Stosowany algorytm określa powierzchnię ewentualnie występującego piksu przy danym czasie dryftu charakterystycznego produktu reakcji jonowo-cząsteczkowych i porównuje go z powierzchnią ustawioną jako próg alarmowy widma zamieszczonego w bibliotece widm urządzenia. Każda analiza poprzedzona była wykonaniem „ślepej” próby w celu ustalenia czystości układu analitycznego. Wyniki przeprowadzonych pomiarów zestawiono w tabelach od 3 do 5.

**Tabela 3.** Skuteczność identyfikacji materiałów wybuchowych pobieranych jako wymaz znad próbek stałych  
**Table 3.** Effectiveness of identification of explosives collected as smear over solid samples

Materiał wybuchowy/ Explosive	Prawdopodobieństwo identyfikacji / Probability of identification [%]			Uwagi/ Remarks
	Wartość średnia / Average value	Wartość minimalna / Minimum value	Wartość maksymalna / Maximum value	
Trotyl / Trinitrotoluene	85	93	81	Jednoczesna sygnalizacja obecności heksogenu z prawdopodobieństwem ~ 5 [%] / Simultaneous signaling of presence of hexogen with probability ~ 5 [%]
Tetryl	82	77	89	
Pentryt / Penthrite	76	70	83	
Oktogen / Octogen	74	70	88	
Heksogen / Hexogen	78	72	88	Jednoczesna sygnalizacja obecności oktogenu i trotylu z prawdopodobieństwem ~ 9 [%] / Simultaneous signaling of presence of octogen and trinitrotoluene with probability ~ 9 [%]
NTO	79	74	85	Jednoczesna sygnalizacja obecności trotylu z prawdopodobieństwem ~ 7 [%] / Simultaneous signaling of presence of trinitrotoluene with probability ~ 7 [%]
FOX-7	77	75	86	

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.



**Tabela 4.** Skuteczność identyfikacji materiałów wybuchowych nastrzykiwanych w postaci roztworów ciekłych o stężeniu 10 [µg/ml]  
**Table 4.** Effectiveness of identification of explosives injected in form of liquid solutions at a concentration of 10 [µg/ml]

Materiał wybuchowy/ Explosive	Prawdopodobieństwo identyfikacji / Probability of identification [%]			Uwagi / Remarks
	Wartość średnia / Average value	Wartość minimalna / Minimum value	Wartość maksymalna / Maximum value	
Trotyl / Trinitrotoluene	98	90	100	Jednoczesna sygnalizacja obecności heksogenu z prawdopodobieństwem ~ 8 [%] / Simultaneous signaling of presence of hexogen with probability ~ 8 [%]
Tetryl	90	88	100	
Pentryt / Penthrite	83	79	89	
Oktogen / Octogen	86	80	92	
Heksogen / Hexogen	92	88	98	Jednoczesna sygnalizacja obecności oktogenu i trotylu z prawdopodobieństwem ~ 12 [%] / Simultaneous signaling of presence of octogen and trinitrotoluene with probability ~ 12 [%]
NTO	83	79	87	Jednoczesna sygnalizacja obecności trotylu z prawdopodobieństwem ~ 8 [%] / Simultaneous signaling of presence of trinitrotoluene with probability ~ 8 [%]
FOX-7	83	77	86	

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

**Tabela 5.** Skuteczność identyfikacji materiałów wybuchowych nastrzykiwanych w postaci roztworów ciekłych o stężeniu 1 [µg/ml]  
**Table 5.** Effectiveness of identification of explosives injected in form of liquid solutions at a concentration of 1 [µg/ml]

Materiał wybuchowy / Explosive	Prawdopodobieństwo identyfikacji / Probability of identification [%]			Uwagi / Remarks
	Wartość średnia / Average value	Wartość minimalna / Minimum value	Wartość maksymalna / Maximum value	
Trotyl / Trinitrotoluene	95	86	100	Jednoczesna sygnalizacja obecności heksogenu z prawdopodobieństwem ~ 6 [%] / Simultaneous signaling of presence of hexogen with probability ~ 6 [%]
Tetryl	89	86	98	
Pentryt / Penthrite	82	72	88	
Oktogen / Octogen	84	80	92	
Heksogen / Hexogen	90	79	93	Jednoczesna sygnalizacja obecności oktogenu i trotylu z prawdopodobieństwem ~ 8 [%] / Simultaneous signaling of presence of octogen and trinitrotoluene with probability ~ 8 [%]
NTO	80	72	83	Jednoczesna sygnalizacja obecności trotylu z prawdopodobieństwem ~ 6 [%] / Simultaneous signaling of presence of trinitrotoluene with probability ~ 6 [%]
FOX-7	81	76	85	

**Źródło:** Opracowanie własne

**Source:** Own elaboration.

Skuteczność identyfikacji każdego rodzaju materiału wybuchowego, bez względu na postać próbki, można uznać za wysoką. Najwyższą wartość prawdopodobieństwa identyfikacji, bez względu na postać próbki, używano w przypadku trotylu. Niemniej jednak, podczas analizy trotylu, heksogenu oraz NTO sygnalizowana była obecność innych materiałów wybuchowych (występowanie interferencji). W przypadku trotylu był to heksogen, w przypadku heksogenu były to oktogen i trotyl, a w przypadku NTO – trotyl. Przyczynami mogły być: 1) zbliżone czasy dryftu charakterystycznych produktów reakcji jonowo-cząsteczkowych powyższych substancji, 2) śladowe zanieczyszczenia próbek innymi materiałami wybuchowymi.

## 6. Podsumowanie

Na podstawie analizy przytoczonych danych z literatury specjalistycznej oraz wyników przeprowadzonych pomiarów, można wskazać pewne prawidłowości, uogólnienia i wnioski. Istnieje wiele metod wykrywania materiałów wybuchowych, przy czym większość z nich sprowadza się jedynie do zasygnalizowania obecności MW. Metody chemii analitycznej stosowane w detekcji i oznaczaniu materiałów wybuchowych, w większości opierają się na wykorzystaniu skomplikowanej i stacjonarnej aparatury pomiarowej, co uniemożliwia ich stosowanie w warunkach polowych. Taką potencjalną możliwość daje spektrometria ruchliwości jonów, ze względu na swoją specyfikę (chemiczną jonizację pod ciśnieniem

atmosferycznym, a tym samym możliwość uproszczenia konstrukcji).

Podkreślić należy, że większość podstawowych materiałów wybuchowych analizowanych przy użyciu spektrometrii ruchliwości jonów jest wykrywanych w ujemnym trybie pracy spektrometru (analiza jonów ujemnych będących produktami reakcji jonowo-cząsteczkowych). Struktura obserwowanych widm w trybie analizy jonów ujemnych wskazuje na ich bardziej skomplikowaną strukturę, niż widm jonów dodatnich obserwowanych podczas analizy innych substancji chemicznych (bojowych środków trujących i środków odurzających). Pomimo stosunkowo niskiej prężności par większości MW, spektrometria ruchliwości jonów z termiczną desorpcją może być skuteczną metodą detekcji MW, chociaż jednoznaczność otrzymywanych wyników detekcji wymaga przeprowadzenia kompleksowych badań wpływu potencjalnych interferentów.

Państwo, jako podmiot a zarazem gwarant bezpieczeństwa strukturalnego i personalnego, dysponuje ogromnym potencjałem naukowym, który powinien być jak najszerzej wykorzystany dla zapewnienia tej egzystencjalnej potrzeby społeczeństwa. Stąd instytucje i służby odpowiedzialne za bezpieczeństwo należy wyposażać zarówno w najnowsze zdobycze techniki, jak i w stosowną wiedzę nt. nowych technologii służących temu bezpieczeństwu.

Autorka wyraża nadzieję, że opisane w artykule wyniki badań naukowych przyczynią się do szerszego spojrzenia na problematykę wykrywania materiałów wybuchowych i innych substancji niebezpiecznych.

## Literatura

- [1] Yinon J., Zitrin S., *Modern methods and applications in analysis of explosives*, John Wiley and Sons Ltd., New York 1996.
- [2] Mierczyk Z. (red.), *Nowoczesne technologie systemów uzbrojenia*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.
- [3] Witczak M., Kloske M., *Materiały wybuchowe i ich charakterystyka*, Kwartalnik „Bellona” Issue 3, 2009.
- [4] Singh S., *Sensors – An effective approach for the detection of explosives*, “Journal of Hazardous Materials” Vol. 144, 2007.
- [5] Bielecki Z., Kłosowski W., Wojtas J., *Optoelektroniczne sensory par materiałów wybuchowych*, „Prace Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji”, Vol. 60/145, 2010.
- [6] Wojtas J., Bielecki Z., Mikołajczyk J., Szabra D., Rutecka B., Mądrzycki R., Gutowska M., Stacewicz T., Czyżewski A., *Projekt sensora par materiałów wybuchowych*, „Przegląd elektrotechniczny” (Electrical Review), Issue 11a, 2010.
- [7] Bielecki Z., Janucki J., Kawalec A., Mikołajczyk J., Pałka N., Pasternak M., Pustelny T., Stacewicz T., Wojtas J., *Sensors and systems for detection of explosive devices an overview*, “Metrology Measurement Systems” Vol. 19, 2012.
- [8] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
- [9] Cygański A., *Metody Spektroskopowe w Chemii Analitycznej*, WNT, Warszawa 2002.
- [10] Cieślak G., *Rola techniki identyfikacji śladowych materiałów wybuchowych i skażeń*, „Lotnisko”, Issue 6, 2008.
- [11] Eiceman G.A., Karpas Z., *Ion Mobility Spectrometry*, CRC Press, Boca Raton 2004.
- [12] Maranda A., *Przemysłowe materiały wybuchowe*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2010.
- [13] Maranda A., Cudziło S., Nowaczewski J., Papliński A., *Podstawy Chemii Materiałów Wybuchowych*, WAT, Warszawa 1997.
- [14] Karpas Z., *Ion Mobility Spectrometry: A tool in the war against terror*, “Bulletin of the Israel Chemical Society”, Issue 24, December 2009.
- [15] Ewing R.G., Atkinson D.A., Eiceman G.A., Ewing G.J., *A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosives and explosive related compounds*, “Talanta” Vol. 54, 2001.
- [16] IONSCAN 500DT – Instrukcja obsługi, Pimco, Warszawa 2006.

\* \* \*

**mgr inż. Marzena Szczurek** – absolwentka Wojskowej Akademii Technicznej, kierunku chemia, specjalność materiały niebezpieczne i ratownictwo chemiczne. Jej zainteresowania naukowe obejmują szeroko pojęty obszar wykorzystywania nowych technologii w służbie bezpieczeństwa narodowego, stąd badania prowadzi nie tylko na Wydziale Nowych Technologii i Chemii, ale również w Instytucie Optoelektroniki WAT i w Centralnym Ośrodku Analizy Skażeń. W swoich publikacjach szczególną uwagę zwraca na problematykę przeciwdziałania zagrożeniom asymetrycznym związanym z wykorzystaniem materiałów wybuchowych i komponentów broni masowego rażenia.