

Władysław Harmata<sup>a)\*</sup>

<sup>a)</sup> *Military University of Technology / Wojskowa Akademia Techniczna*

\* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: w.harmata@interia.pl*

## Ion Mobility Spectrometry as a Part of a System for Rapid Detection of Toxic Chemicals

### Spektrometria ruchliwości jonów jako element układów do szybkiego wykrywania toksycznych substancji chemicznych

#### ABSTRACT

**Aim:** The aim of this paper is to present ion mobility spectrometry as a method for the local detection of chemical contaminants.

**Introduction:** According to the doctrine currently in force in the Military Forces of the Republic of Poland, contamination reconnaissance is the action aimed at identifying the occurrence of chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) incidents or the presence of a CBRN agent in the environment. It involves observation, detection and specific contamination reconnaissance. **Observation** is the systematic tracking of the airspace, ground areas, people, animals and materials. Devices of visual, sound, electronic and photographic observation or other devices enabling the identification of a CBRN incident or the presence of a CBRN agent in the environment are used for that purpose. **Detection** is the action aimed at confirming the occurrence of a CBRN incident or the presence of a CBRN agent in the environment while **specific reconnaissance** is the action taken to specify the type and level of contaminants in the area once the occurrence of a CBRN incident or the presence of a CBRN agent in the environment is confirmed.

Contamination reconnaissance should be prepared and performed as appropriate to the threat level. Moreover, the equipment and operating procedures employed to that end should ensure immediate alerts on the presence of CBRN agents. The current technological advancement of equipment used by fire brigades requires that fire and rescue operations take into account the careful identification of threats which may be present during the operation. The necessity for carrying out reconnaissance results from the nature of buildings under fire. While preparing measures for fighting fires of dangerous chemicals present at a given location and their properties, one should take into account chemical weapon agents (CWAs), toxic industrial chemicals (TICs), explosives, gases creating flammable or self-igniting mixtures, radioactive sources, etc.

**Conclusions:** Contamination threats in the territory of the Republic of Poland are on an upward trend. The entities included in the National System of Contamination Detection and Alerting should be prepared, in both technical and procedural terms, for conducting reconnaissance and initial identification of contaminants at the place of their occurrence. The system is equipped with devices using ion mobility spectrometry (IMS). According to global trends, these devices should be successively replaced with solutions characterised by better sensitivity and selectivity. New devices could be based on differential mobility spectrometry (DMS). This solution should apply to portable and transportable instruments. The application of new technical solutions should be accompanied by the unification of the system in the area of contamination reconnaissance and the creation of cooperation plans, and this would have a significant impact on the safety of people and infrastructure.

**Keywords:** contamination reconnaissance, spectrometry, ion mobility

**Type of article:** review article

---

Received: 29.08.2019; Reviewed: 21.11.2019; Accepted: 26.11.2019;

Authors' ORCID ID: 0000-0001-6271-9000;

Please cite as: SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 174–192, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.14>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Celem artykułu jest prezentacja spektrometrii ruchliwości jonów jako metody punktowego wykrywania skażeń chemicznych.

**Wprowadzenie:** Zgodnie z dokumentem doktrynalnym obowiązującym w SZ RP *Obroń przed bronią masowego rażenia w operacjach połączonych* rozpoznanie skażeń to działanie mające na celu stwierdzenie faktu wystąpienia zdarzenia CBRN lub obecności czynnika CBRN w środowisku. Realizowane jest poprzez obserwację, wykrywanie oraz szczegółowe rozpoznanie skażeń. **Obserwacja** to systematyczne śledzenie przestrzeni powietrznej, obszarów naziemnych, ludzi, zwierząt oraz materiałów. W tym celu wykorzystywane są przyrządy obserwacji wzrokowej, dźwiękowej, elektronicznej, dokumentowania fotograficznego lub inne urządzenia służące do stwierdzenia obecności lub braku zagrożenia CBRN. **Wykrywanie** to działanie mające na celu potwierdzenie faktu zaistnienia zdarzenia CBRN lub obecności czynnika CBRN. Z kolei **rozpoznanie szczegółowe** to działanie podejmowane w celu określenia rodzaju i poziomu skażeń w rejonie potwierdzonego lub prognozowanego ich wystąpienia.

Rozpoznanie skażeń powinno być przygotowane i realizowane stosownie do poziomu zagrożenia, a sprzęt i procedury działania powinny zapewnić natychmiastowe alarmowanie o obecności czynników CBRN. Aktualny stan zaawansowania techniki pożarnej wymaga uwzględnienia w planowaniu akcji ratowniczo-gaśniczych starannego rozpoznania zagrożeń, jakie mogą zaistnieć w trakcie wykonywania zadania. Oczywista jest konieczność rozpoznania wynikająca z charakteru gaszonego obiektu. Podczas przygotowywania środków do zdławienia pożaru w obiekcie należy brać pod uwagę niebezpieczne substancje chemiczne, które w nim występują, a także ich charakter (bojowe środki trujące, toksyczne środki przemysłowe, materiały wybuchowe, gazy tworzące mieszanki łatwopalne lub samozapalne, źródła promieniotwórcze itp.).

**Wnioski:** Zagrożenia skażeniami terytorium RP mają tendencję zwyżkową. Podmioty wchodzące w skład Krajowego Systemu Wykrywania Skażeń i Alarmowania powinny być przygotowane pod względem technicznym i proceduralnym na prowadzenie rozpoznania i wstępnej identyfikacji skażeń w miejscu ich występowania. System wyposażony jest w urządzenia wykorzystujące spektrometrię IMS. Zgodnie z trendami światowymi urządzenia te powinny być sukcesywnie zastępowane rozwiązaniami cechującymi się lepszą czułością i selektywnością. Takimi urządzeniami mogłyby być przyrządy oparte o spektrometrię DMS. Dotyczy to przyrządów przenośnych i przewoźnych. Wprowadzeniu nowych rozwiązań technicznych powinno towarzyszyć ujednoczenie systemu w zakresie rozpoznania skażeń, stworzenie planów współdziałania, a to miałyby istotny wpływ na bezpieczeństwo ludzi i infrastruktury.

**Słowa kluczowe:** rozpoznanie skażeń, spektrometria, ruchliwość jonów

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

---

**Przyjęty:** 29.08.2019; **Zrecenzowany:** 21.11.2019; **Zatwierdzony:** 26.11.2019;

Identyfikator ORCID autora: 0000-0001-6271-9000;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 174–192, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.14>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

## Introduction

Air pollution (contamination) monitoring is a crucial component in preventing environmental degradation and ensuring public safety. The term 'pollution' as used in this article refers to accidentally released hazardous gases from chemical plants or factories and threats caused by explosives, illegal drugs and – in military operations – chemical weapon agents (CWAs).

Easy-to-use and economical devices enabling the selective detection of toxic compounds should be available to make the detection and measurement of dangerous substances released to the air both simple and fast.

Instrumental methods used for analysing gaseous air pollutants are based on physico-chemical phenomena, with analytical signals generated by means of devices displaying various degrees of complexity. Such methods enable qualitative and quantitative analyses to be performed simultaneously, their advantages being high sensitivity, detectability and quantification of substances. In addition, their short response time (detection speed) appears essential, especially in the circumstances of an accidental release of flammable and toxic gases.

Given the advantages listed above, instrumental methods have been widely applied in determining safety zones following an accidental release of gases. "[...] Technical means of contamination reconnaissance are expected to display high detectability, high operational speed and the capability of identifying poisonous agents" [2]. Portable automatic devices for chemical contamination reconnaissance constitute the most frequently used equipment capable of detecting chemical weapons. Their mechanical structure is usually quite complex, and their operation involves mainly physical and physico-chemical detection techniques, including ionisation, spectrophotometry, gas thermal conductivity measurement and mass spectrometry.

## Wprowadzenie

Monitoring zanieczyszczeń (skażeń) powietrza jest obecnie niezwykle ważnym elementem w zapobieganiu degradacji środowiska oraz w zapewnianiu bezpieczeństwa zdrowotnego ludności. Pojęcie „zanieczyszczenie”, w kontekście niniejszego artykułu, odnosi się zarówno do niebezpiecznych dla życia gazów uwalnianych przypadkowo przez zakłady chemiczne czy fabryki, jak i do zagrożeń związanych z obecnością materiałów wybuchowych, narkotyków oraz – w aspekcie militarnym – bojowych środków trujących (BST).

Wykrywanie i mierzenie uwalnianych do atmosfery niebezpiecznych substancji powinno odbywać się w łatwy i szybki sposób, z wykorzystaniem nieskomplikowanych w użyciu i ekonomicznych przyrządów z funkcją wykrywania selektywnego toksycznych związków.

Metody instrumentalne stosowane w analizie gazowych zanieczyszczeń powietrza związane są ze zjawiskami fizykochemicznymi. Sygnał analityczny uzyskuje się przy pomocy przyrządów o różnym stopniu złożoności. Wykorzystanie tych metod pozwala na jednoczesną analizę jakościową i ilościową. Ich zaletą jest duża czułość, wykrywalność i oznaczalność substancji. Nie bez znaczenia jest również krótki czas odpowiedzi (szybkość wykrywania), który w przypadkach awaryjnych uwolnień gazów palnych i toksycznych jest niezmiernie ważny.

Wymienione wyżej zalety powodują, że metody instrumentalne znalazły szerokie zastosowanie podczas wyznaczania zasięgu stref bezpieczeństwa po awaryjnych uwolnieniach gazów. „[...]Od technicznych środków rozpoznania skażeń wymagana jest wysoka wykrywalność, duża szybkość działania oraz zdolność identyfikacji środka trującego” [2]. Najczęściej stosowanymi przyrządami sygnalizującymi użycie broni chemicznej są przenośne, automatyczne przyrządy rozpoznawania skażeń chemicznych. Ich budowa mechaniczna zazwyczaj jest złożona. Działanie wykorzystuje głównie fizyczne i fizykochemiczne metody detekcji – jonizacyjne, spektrofotometryczne, pomiaru przewodności cieplnej gazów oraz spektrometrię mas.

In order to detect threats caused either by an uncontrolled release of toxic chemical substances to the environment (transport or industrial breakdowns, terrorism) or by smuggling of chemical (explosives, illegal drugs), biological or radioactive substances, the entities in charge of safety, and in particular the Military Forces of the Republic of Poland, the State Fire Brigades and the National Border Guards, need to employ professional and high-tech solutions for the prompt reconnaissance (and often also monitoring) of contamination incidents. In the age of the growing incidence of so-called lifestyle diseases (e.g. type 2 diabetes) and a significant impact of environmental contamination on human health and life, it appears necessary to be able to quickly analyse, for instance, metabolites or so-called biomarkers through pre-medical tests. Aiming at a fast, selective and sufficiently sensitive analysis of chemical substances present in the air (such as CWAs, TICs, illegal drugs, explosives or metabolites in exhaled air), such techniques as ion mobility spectrometry (IMS) or differential ion mobility spectrometry (DMS) can be used. Devices equipped with IMS or DMS-based detectors are utilised, for instance, by military forces around the world, as well as by State Fire Brigades and the National Border Guards, for contamination reconnaissance. Their major advantages include sampling performed on-site and a possibility to remotely detect, provisionally identify and measure dangerous substance concentration.

### Analytical spectroscopy and its use in portable automatic devices for measuring the concentrations of various air pollutants

Spectroscopy is the study of the occurrence and interpretation of spectra generated through interactions of all kinds of radiation with groups of atoms and molecules. By observing them, the structure and properties of atoms, molecules and atomic nuclei can be determined, which are then used as a basis for describing the structure of chemical compounds and mechanisms governing individual reactions. Spectroscopy provides a theoretical basis for spectroscopic methods which can be divided by applying the following criteria:

- the manner of spectrum generation:
  - absorption spectroscopy – performed across the electromagnetic spectrum to measure the absorption of radiation;
  - emission spectroscopy – performed across the electromagnetic spectrum to measure emissions in a given system;
  - raman spectroscopy – performed across the electromagnetic spectrum to determine vibrational modes of molecules based on inelastic scattering;
- the type of a system:
  - atomic spectroscopy – performed on the linear spectrum generated by the electrons moving between various energy levels of an atom;
  - molecular spectroscopy – performed on molecular spectra;

Wykrywanie zagrożeń spowodowane niekontrolowanym uwolnieniem do środowiska toksycznych substancji chemicznych (awarie transportowe, przemysłowe, terroryzm) czy przemyt substancji chemicznych (materiały wybuchowe, narkotyki), biologicznych lub promieniotwórczych wymaga od służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo, a mianowicie SZ RP, Państwowej Straży Pożarnej, Straży Granicznej, profesjonalnych, zaawansowanych technologicznie rozwiązań do szybkiego rozpoznania (a często i monitorowania) zaistniałych skażeń. W dobie wzrostu zachorowań na tzw. choroby cywilizacyjne (np. cukrzycę) i wpływu skażeń środowiskowych na zdrowie i życie ludzi zachodzi konieczność szybkiej analizy np. metabolitów czy tzw. biomarkerów w badaniach przedlekarskich. Do szybkiej, selektywnej i odpowiednio czulej analizy substancji chemicznych w powietrzu (BST, toksyczne substancje przemysłowe – TSP, narkotyki, materiały wybuchowe, metabolity w wydychanym powietrzu) mogą być wykorzystane techniki spektrometrii ruchliwości jonów IMS (*ion mobility spectrometry*) lub różnicowa spektrometria ruchliwości jonów DMS (*differential ion mobility spectrometry*). Urządzenia wyposażone w tego typu detektory wykorzystywane są np. w wielu armiach świata oraz jednostkach PSP i Straży Granicznej do rozpoznania skażeń. Ich główną zaletą jest próbkowanie w miejscu występowania zagrożenia oraz możliwość zdalnej detekcji oraz wstępnej identyfikacji i pomiaru stężenia substancji niebezpiecznej.

### Analityczne techniki spektroskopowe i ich zastosowanie w automatycznych przenośnych przyrządach do pomiaru stężenia różnych zanieczyszczeń w powietrzu

Spektroskopia jest nauką o powstawaniu i interpretacji widm wytworzonych w wyniku oddziaływania wszelkich rodzajów promieniowania na zbiorowisko atomów i cząsteczek. Dzięki ich obserwacji można określić budowę i właściwości atomów cząsteczek i jąder atomowych, a na tej podstawie wyjaśnić struktury związków chemicznych oraz mechanizmy poszczególnych reakcji. Spektroskopia jest podstawą teoretyczną metod spektroskopowych. Jej podział można zastosować względem następujących kryteriów:

- metoda otrzymywania widma:
  - spektroskopia absorpcyjna – polega na badaniu widma promieniowania elektromagnetycznego, które przeszło przez środowisko pochłaniające;
  - spektroskopia emisyjna – polega na badaniu widma promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez dany układ;
  - spektroskopia ramanowska – polega na badaniu widma promieniowania elektromagnetycznego rozproszonego niesprężysto na cząsteczkach danej substancji;
- rodzaj układu materialnego:
  - spektroskopia atomowa – polega na badaniu widma o strukturze liniowej, powstającego w wyniku przejść elektronów między różnymi stanami energetycznymi atomu;
  - spektroskopia molekularna – obejmuje badania widm cząsteczkowych;

- nuclear spectroscopy – performed on nuclear spectra, including NMR spectroscopy;
  - electron spectroscopy – performed to determine the electronic structure and its dynamics in atoms and molecules;
- wavelength range – including space spectroscopy, gamma-ray spectroscopy, X-ray spectroscopy, optical spectroscopy, microwave spectroscopy, acoustic spectroscopy and radio spectroscopy [3].

The most useful spectroscopic methods which are used in automatic portable devices for measuring chemical contamination include the following: atomic absorption spectrometry, atomic emission spectrometry, which includes radiation photometric spectroscopy, and ionisation methods, the latter including **ion mobility spectrometry**.

### Ion mobility spectrometry (IMS) – background

Ion mobility spectrometry is a technique used to detect chemical weapon agents [4], toxic industrial chemicals [5], illegal drugs [6] and explosives [7].

First ionisation methods for detecting components of gaseous mixtures were developed in 1970. This was when the analytical method was established which enabled measuring not only ionic currents, as had been previously done in electron capture detectors (ECDs) or cylindrical detectors of air ions (CDIs), but also mobility of analyte ionisation products. The original name of plasma chromatography was later replaced with ion mobility spectrometry [8].

Substances are identified based on the speed of ions generated from their molecules, with ion mobility in a gaseous substance being facilitated by a proper electric field. Crucial for IMS is the following equation defining mobility coefficient  $K$ :

$$K = \frac{v_d}{E} \quad (1)$$

where:  $v_d$  – drift velocity,  $E$  – electric field intensity [8].

- spektroskopia jądrowa – polega na badaniu widm jądrowych, do niej zalicza się spektroskopię NMR;
  - spektroskopia elektronów – polega na badaniu rozkładu energii w widmie elektronów emitowanych przez atomy i cząsteczki;
- zakres długości fal promieniowania – zaliczyć można tu spektroskopię kosmiczną, gamma, rentgenowską, optyczną, mikrofalową, akustyczną i radiospektroskopię [3].

Do najważniejszych metod spektroskopowych mających zastosowanie w automatycznych, przenośnych przyrządach do pomiaru skażeń chemicznych zaliczyć można: absorpcyjną spektrometrię atomową, atomową spektroskopię emisyjną, do której należy spektrometria płomieniowo-fotometryczna, metody jonizacyjne, a wśród nich **spektrometria ruchliwości jonów**.

### Spektrometria ruchliwości jonów (IMS) – podstawy

Spektrometria ruchliwości jonów IMS jest techniką stosowaną do wykrywania bojowych środków trujących [4], toksycznych środków przemysłowych [5], narkotyków [6] oraz materiałów wybuchowych [7].

Rozwój jonizacyjnych metod wykrywania składników mieszanin gazowych nastąpił w 1970 roku. Opisano wówczas metodę analityczną, w której mierzone są nie tylko prądy jonowe (jak to miało miejsce w detektorach wychwytu elektronu ECD lub cylindrycznych detektorach jonizacyjnych CDI), ale także ruchliwości produktów jonizacji analitu. Pierwotną nazwę chromatografii plazmowej zastąpiono określeniem spektrometrii ruchliwości jonów [8].

Identyfikacja substancji możliwa jest na podstawie szybkości ruchu jonów wytworzonych z cząsteczek tych substancji. Ruch jonów w gazie możliwy jest dzięki odpowiedniemu polu elektrycznemu. Podstawową zależnością dla IMS jest równanie definiujące współczynnik ruchliwości  $K$ :

$$K = \frac{v_d}{E} \quad (1)$$

gdzie:  $v_d$  – prędkość dryftu,  $E$  – natężenie pola elektrycznego [8].

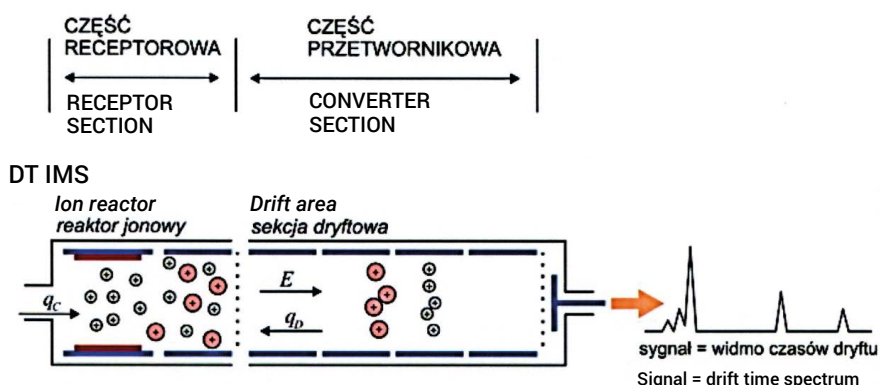
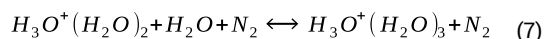
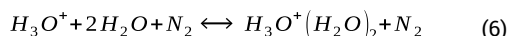
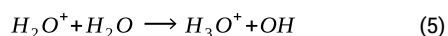
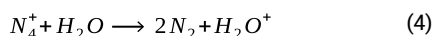
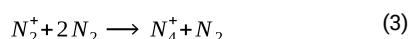
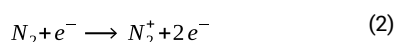


Figure 1. Operating principle of an IMS detector [8]  
Rycina 1. Zasada działania detektora IMS [8]

The ion mobility spectrometer chamber is divided into two areas – the reactive area where gas ionisation takes place, and the drift area with a collecting electrode. The generated ions of various mobilities and weights are directed towards a control grid operating in an open-close scheme. This effect is induced by the potential that enables the ion current to go further to the collecting electrode. The temporary opening of the chamber is initiated by short impulses which result in the current peak being visible on the collecting electrode [10].

The internally generated drift gas transports the molecules to radiation source  $\beta$   $^{63}\text{Ni}$ , which is where a multi-stage ionisation process takes place [11, p.13].



The generated hydronium ion  $(\text{H}_3\text{O}^+)(\text{H}_2\text{O})_n$  interacts with analyte molecules prompting ion formation. Doping materials are often added to drift gas (which is usually dried air) for modifying the ionisation process. The ions moving towards the collecting electrode are accelerated by a weak electric field 100 to 300 V/cm [12, p.145]. Considering that ion movement takes place in the drift chamber in the opposite direction to the drift gas, the ions collide with drift gas molecules, as a result of which the division process is initiated, and the order with which they discharge on the collecting electrode is determined by mobility coefficients.

The theoretical value of the ion mobility coefficient can be determined using the Mason-Schamp equation [13].

$$K = \frac{3q}{16N} \cdot \left( \frac{2\pi}{\mu kT} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1+\alpha}{\Omega} \quad (8)$$

where:

q – the ion charge,

N – the drift gas number density,

k – the Boltzmann constant,

T – temperature,

$\alpha$  – the correlation coefficient (lower than 0.02),

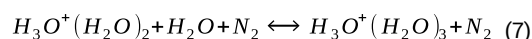
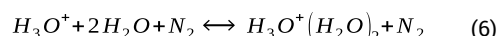
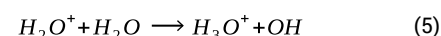
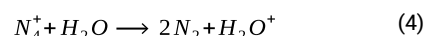
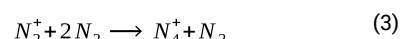
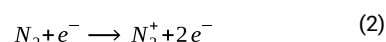
$\mu$  – the reduced mass of the ion and the drift gas molecules,

$\Omega$  – the collision cross-section.

The ions reach the electrode at various times and velocities. These differences depend on such factors as the weight and charge of the ionised molecule, the charge-specific electric field strength, and drift tube length.

Komora w spektrometrze ruchliwości jonów podzielona jest na dwa obszary – obszar reakcyjny, w którym dochodzi do jonizacji gazu, i obszar dryftu zakończony elektrodą zbiorczą. Otrzymane jony o różnych ruchliwościach i masach kierowane są w stronę siatki dozującej działającej na zasadzie otwórz – zamknij. Efekt ten generowany jest przez potencjał, który umożliwia pracę prądem jonowym docierającym dalej do elektrody zbiorczej. Chwilowe otwarcie komory inicjowane jest przez krótkie impulsy, doprowadzające do tego, że na elektrodzie zbiorczej zauważyć można pik prądowy [10].

Gaz nośny wytworzony w układzie wewnętrznym transportuje analizowane cząstki do źródła  $\beta$  promieniotwórczego  $^{63}\text{Ni}$ , gdzie następuje wieloetapowy proces jonizacji [11, s.13].



Powstały jon hydroniowy  $(\text{H}_3\text{O}^+)(\text{H}_2\text{O})_n$  oddziałuje z cząsteczkami analitu i tworzy jego jony. Często w celu modyfikacji procesu jonizacji domieszkuje się gaz nośny, którym zazwyczaj jest osuszone powietrze, dodatkowymi substancjami tzw. „dopantami”. Jony w kierunku elektrody zbiorczej są przyspieszane w słabym polu elektrycznym 100 do 300 V/cm [12, s.145]. Ich ruch odbywa się w komorze dryftowej w przeciwnym kierunku do gazu dryftowego, w wyniku czego zderzają się z jego cząsteczkami, następuje właściwy proces rozdziału jonów, a kolejność w jakiej rozładują się na elektrodzie zbiorczej jest określona na podstawie współczynników ruchliwości.

Teoretyczną wartość współczynnika ruchliwości jonów można wyznaczyć przy użyciu równania Masona-Schampa [13].

$$K = \frac{3q}{16N} \cdot \left( \frac{2\pi}{\mu kT} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1+\alpha}{\Omega} \quad (8)$$

gdzie:

q – ładunek jonu,

N – liczba gęstości gazu dryftowego,

k – stała Boltzmana,

T – temperatura,

$\alpha$  – współczynnik korekcyjny (mniejszy od 0,02),

$\mu$  – masa zredukowana jon-molekuła gazu,

$\Omega$  – przekrój czynny na zderzenia.

Jony docierają do elektrody w różnym czasie i z różną prędkością. Różnice te wynikają z takich zależności jak ciężar i ładunek zjonizowanej cząstki, natężenie pola elektrycznego wewnątrz ładunku, długość sekcji dryftowej.

## Practical solutions based on IMS

Ion mobility spectrometry, capable of detecting and identifying organic substances which are considered highly dangerous, has been used for constructing signalling devices utilised by military forces and fire brigades in many countries, as well as in airports, mainly to detect explosives.

Three types of IMS-based devices can be distinguished, i.e.

- portable chemical contamination reconnaissance devices;
- chemical and radioactive contamination reconnaissance devices forming part of both movable and immovable collective protection measures;
- contamination reconnaissance, alerting and warning devices used as part of collective protection measures.

Among the portable devices equipped with IMS detectors, **CAM** (a chemical agent monitor) merits special attention (Figure 2a). This is the first mass-produced automatic detector of CWAs belonging to groups G, V and H, which has enjoyed huge popularity on the market. As reported by its producer, the device was sold in some 50,000 copies within the first five years of its marketing, in several dozen countries around the world (including NATO and Middle East countries). This has led to a range of comparable devices, but with better properties, including **ICAM** – an improved chemical agent monitor, **ECAM** – an enhanced chemical agent monitor, **CAM-2** and **CAM Plus**, which additionally enable detecting certain toxic industrial chemicals (TICs). Similar to AP2C, the original CAM device and its subsequent versions only enable identifying the CWA group (but not specific compounds), the difference being that one measurement detects only one CWA group (G or H). The device operation mode needs to be manually activated. In addition to being easy to operate, CAM devices are also light, have short measurement times (around 1 s) and can be used as quickly as within 1 minute after being turned on; the battery lasts 6–8 hours, and measurements can be performed in various weather conditions. In addition, the operation costs are low as CAM has its own (embedded) source of radiation which is used for ionisation ( $^{63}\text{Ni}$ ) [17]. The main drawbacks include detectability limits above the threshold limit values (TLVs) of the detected compound types V ( $0.0001 \text{ mg/m}^3$ ) and H ( $0.003 \text{ mg/m}^3$ ), and low specificity. Studies of the impact of various interfering factors (e.g., liquid fuels, household cleaning products containing chlorine, exhaust fumes, solutions of calcium hypochlorite and ammonia solutions, as well as tyre, wood, paper and clothing incineration smoke) on measurements performed with CAM devices type L (the standard version combining CAM-2 with CAMPlus software), have revealed that false positives for the H and G operation modes reach 36% and 53%, respectively [15].

**RAID devices** (including RAID-AFM, RAID M-100, RAID-S2, RAID-XP,  $\mu$ RAID) form another group of detection devices. Among these, RAID-M100 (Figure 2b) is very popular, which offers some advantages that are not available in CAM devices. The biggest advantage of RAID-M100 is that, along with simultaneously detecting the CWA groups (G and H) and determining their con-

## Rozwiązania praktyczne oparte o technikę IMS

Dzięki możliwości wykrywania i identyfikacji substancji organicznych uznawanych za wysoce niebezpieczne spektrometria ruchliwości jonów wykorzystana została przy konstrukcji sygnalizatorów stosowanych w SZ wielu państw w jednostkach PSP oraz na lotniskach głównie do wykrywania materiałów wybuchowych.

Z przyrządów opartych na technice IMS możemy wyróżnić trzy typy urządzeń:

- przenośne przyrządy do rozpoznania skażeń chemicznych;
- przyrządy do wykrywania skażeń chemicznych i promieniotwórczych montowane na ruchomych i stałych środkach ochrony zbiorowej;
- przyrządy do rozpoznawania oraz alarmowania i ostrzegania w zbiorowych środkach ochrony przed skażeniami.

Spośród przenośnych detektorów skażeń opartych o metodę IMS wartym przedstawienia jest przyrząd **CAM** (ryc. 2a). Jest pierwszym seryjnie produkowanym automatycznym sygnalizatorem BST należącym do grup typu G, V oraz H, który zdobył szerokie uznanie na rynku. Jak informuje producent, w pięć lat od wprowadzenia na rynek sprzedano około 50 tysięcy egzemplarzy przyrządu do kilkunastu krajów całego świata (w tym m.in. członkom NATO i krajom Środkowego Wschodu). Spowodowało to, że na jego bazie wyprodukowano szereg przyrządów o ulepszonych właściwościach, takich jak: **ICAM** – Improved Chemical Agent Monitor, **ECAM** – Enhanced Chemical Agent Monitor, **CAM-2** oraz **CAM Plus**, które pozwalają wykryć dodatkowo niektóre TSP. Podobnie do AP2C, CAM i jego wersje pozwalają na wykrycie jedynie grupy BST (bez identyfikacji konkretnych związków) z tą różnicą, że w trakcie pojedynczego pomiaru może zostać wykryta tylko jedna grupa (G lub H) BST. Manualnego włączenia wymaga ponadto wybór odpowiedniego trybu pracy urządzenia. Przyrządy CAM charakteryzują się prostą obsługą, małą masą, krótkim czasem pomiaru (około 1 s), a także szybką gotowością do wykonywania pomiarów po włączeniu (1 minuty), od 6 do 8-godzinnym czasem pracy na pojedynczej baterii oraz możliwością prowadzenia pomiarów w różnych warunkach atmosferycznych. Niskie są także koszty eksploatacji przyrządu ze względu na wykorzystanie do jonizacji wbudowanego źródła promieniotwórczego ( $^{63}\text{Ni}$ ) [17]. Główne wady przyrządu to granice wykrywalności powyżej Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń (NDS) wykrywanych związków typu V ( $0.0001 \text{ mg/m}^3$ ) oraz H ( $0.003 \text{ mg/m}^3$ ) oraz niska swoistość. Na podstawie otrzymanych wyników badań wpływu różnych czynników interferujących (m.in. paliw płynnych, domowych środków czyszczących zawierających chlor, spalin silnikowych, roztworu podchlorynu wapnia, roztworu amoniaku, a także dymów ze spalanych opon, drewna, papieru i odzieży) na pomiar CAM typu L (standardowa wersja przyrządu łącząca CAM-2 z oprogramowaniem CAMPlus) określono, że wskaźniki alarmów fałszywych pozytywnie wyniosły dla trybu pracy H oraz G odpowiednio 36% oraz 53% [15].

Oprócz serii przyrządów CAM na rynku dostępne są przyrządy z serii **RAID** (RAID-AFM, RAID M-100, RAID-S2, RAID-XP,  $\mu$ RAID). Bardzo znany jest przyrząd RAID-M100 (ryc. 2b). Jego dużą zaletą w porównaniu do przyrządu CAM jest fakt, że oprócz jednoczesnego wykrywania grup BST (typ G i H) oraz określenia ich stężenia,

centrations, it also allows identifying the most popular representatives of CWAs, such as tabun (GA), sarin (GB), soman (GD), cyclosarin (GF), Vx, Russian Vx (VxR), sulphur yperite (HD), nitrogen yperite (HN), lewisite (L), prussic acid (AC) and some TICs containing chlorine ( $Cl_2$ ), chlorites ( $Cl_x$ ), sulphur dioxide ( $SO_2$ ) and cyanides (CY). The device, upon detecting a toxic agent, displays its name (acronym) on a LCD screen, together with concentration, presented as one of the eight available concentration levels. Sound and visual signals (lamps) are also used to denote the concentration level. In addition, with an embedded continuous data recording system, based on two integrated recorders, RAID-M100 makes it possible to monitor contamination on an ongoing basis. The two recorders enable two independent spectrum records to be stored on the device (up to 30), together with the following measurement data: date and time of measurement, type and concentration of the detected substance (up to 3000 items). Access to the recorded data is possible through the RAID EventReader software provided with the device. However, disconnecting the device from the power source results in irretrievable loss of all the data that was stored on it. On each activation, the device is set to automatically perform self-control of operational correctness.

Similar to CAM, RAID-M100 has a light structure (less than 3 kg), offers low operation costs (the replacement or servicing of the ionisation source – the isotope – are not required  $^{63}Ni$ ), and it is easy to use, as it has only two buttons which the operator can use with one hand, even in protective clothing and with thick gloves on. The device is also water-proof (up to 1 m) and its battery lasts 6 hours [16]. As regards studies of the device measurement specificity, generally-available findings concern the previous version of the device, i.e. the RAID-M model, based on the same measurement method as RAID-M100 but with worse operation parameters. These studies revealed that the low and high temperatures in the environment where the measurement was performed resulted in a six- and seven-fold decrease, respectively, in detection sensitivity for HD. No such effect was observed for GA, while for GB extreme temperature values were found to cause a three-fold reduction of the device sensitivity. The impact of the same interfering factors on measurement was determined as in the studies of the CAM device (type L), including calcium hypochlorite, combustion products of liquid fuels, and the products of plastic materials, wood or cardboard incineration. It was revealed that the combustion products of liquid fuels, contrary to other materials, did not influence measurements performed with the device. In addition, RAID-M was also found to display a lower general number of false positives than the CAM device, at around 25% [17].

pozwała także na identyfikację najbardziej popularnych przedstawicieli BST, takich jak: tabun (GA), sarin (GB), soman (GD), cyklosarin (GF), Vx, Vx rosyjski (VxR), iperyt siarkowy (HD), iperyt azotowy (HN), luisyt (L), kwas pruski (AC) oraz niektórych TSP chloru ( $Cl_2$ ), chlorki ( $Cl_x$ ), ditlenek siarki ( $SO_2$ ), cyjanki (CY). Przyrząd po wykryciu środka trującego wyświetla jego nazwę na ekranie LCD (w postaci akronimu), obok którego umieszczona jest także wartość jego stężenia ze wskazaniem jednego z ośmiu dostępnych poziomów stężeń. Wartość wykrytego stężenia jest także sygnalizowana sygnałem dźwiękowym oraz wizualnie (przy pomocy lampek). RAID-M100 pozwala prowadzić także ciągle monitoring skażeń dzięki posiadaniu wbudowanego systemu do ciągłego zapisu danych opartego o dwa zintegrowane rejestratory. Umożliwiają one prowadzenie dwóch niezależnych od siebie zapisów w pamięci widm (maksymalnie 30) oraz wyników pomiarów: data i godzina pomiaru, rodzaj i stężenie wykrytej substancji (maksymalnie 3000). Dostęp do zapisanych danych umożliwia dostarczane wraz z przyrządem oprogramowanie RAID EventReader. Całkowite odłączenie zasilania powoduje bezpowrotną utratę wszystkich zapisanych w pamięci przyrządu danych. W trakcie każdego uruchomienia przyrząd jest ustawiony na automatyczne dokonanie samokontroli poprawności działania.

RAID-M100 posiada, podobnie jak CAM, niewielką masę (poniżej 3 kg), niskie koszty eksploatacji (nie wymaga wymiany oraz serwisowania posiadanego źródła jonizacji, które pełni izotop  $^{63}Ni$ ) oraz jest prosty w obsłudze – posiada tylko dwa przyciski, które operator przyrządu może obsługiwać jedną ręką nawet w założonych grubych rękawicach i odzieży ochronnej. Charakteryzuje się ponadto wodoszczelnością (do 1 m) i sześciogodzinnym czasem pracy na pojedynczej baterii [16]. Dostępne są badania nad poprzednikiem przyrządu, modelem RAID-M bazującym na tej samej metodzie pomiarowej co RAID-M100, ale o gorszych parametrach użytkowych. Badania te wykazały, że niska i wysoka temperatura otoczenia, w którym wykonywany jest pomiar, powoduje odpowiednio sześciokrotny i siedemnastokrotny spadek czułości RAID-M w wykrywaniu HD. Efektu tego nie zaobserwowano dla GA, natomiast podczas wykrywania GB ekstremalne wartości temperatur zmniejszają czułość przyrządu trzykrotnie. Wykonano także pomiary wpływu tych samych czynników interferujących na pomiar, co w badaniach przeprowadzonych nad CAM (wersja L), m.in. podchlorynu wapnia, produktów spalania paliw płynnych, produktów spalania tworzyw sztucznych, drewna, kartonu. Zauważono, że produkty spalania paliw płynnych – w przeciwieństwie do produktów spalania innych materiałów – nie mają wpływu na pomiary przyrządu. Określono także, że RAID-M cechuje się mniejszą ogólną liczbą alarmów fałszywie dodatnich niż CAM, która wynosi około 25% [17].



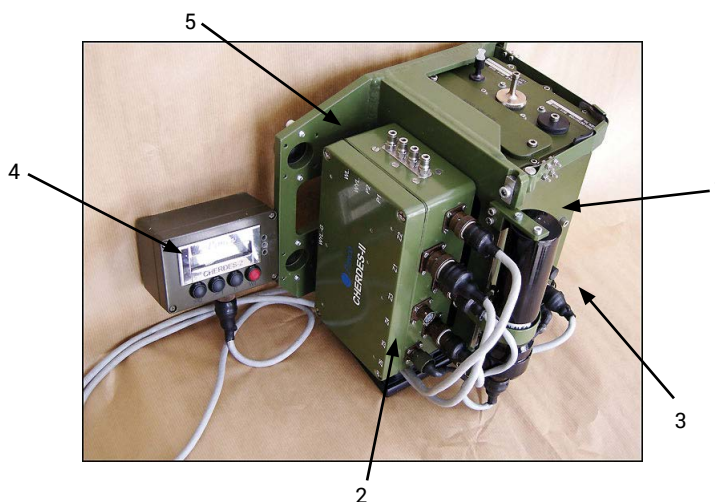
Figure 2. Portable devices with an IMS detector: a) CAM, b) RAID-M100 [18–19]  
Rycina 2. Przenośne przyrządy z detektorem IMS: a) CAM, b) RAID-M100 [18–19]

Devices intended for movable collective protection measures form the second group of devices based on IMS detectors. One of these is CHERDES II-M (Figure 3), a monitor of chemical and radioactive contaminants, which serves the purpose of detecting and identifying chemical weapon agents, toxic industrial chemicals, radioactive contamination and close nuclear explosions, as well as measuring the dose and strength of gamma radiation [20].

Drugą grupę przyrządów opartych o detektory IMS stanowią urządzenia montowane na ruchomych środkach ochrony zbiorowej. Przykładem może być sygnalizator skażeń chemicznych i promieniotwórczych CHERDES II-M (ryc. 3), który służy do wykrywania i identyfikacji skażeń bojowymi środkami trującymi (BST), toksycznymi środkami chemicznymi (TSP), wykrywania skażeń promieniotwórczych, bliskich wybuchów jądrowych oraz pomiaru dawki i mocy dawki promieniowania gamma [20].

- 1 – An automatic monitor of chemical contaminants GID-3;
- 2 – A section of TIC and close nuclear explosions detection;
- 3 – A radiometric probe – ZR-1 (2 pcs. external and internal one);
- 4 – A display panel;
- 5 – A shock-absorbed assembly frame;
- 6 – A section of air intake TATS (unseen on the photo)

- 1 – Automatyczny sygnalizator skażeń chemicznych GID-3;
- 2 – Blok wykrywania skażeń TSP i wykrywania bliskich wybuchów jądrowych;
- 3 – Sonda radiometryczna – ZR-1 (2 szt. zewnętrzna i wewnętrzna);
- 4 – Pulpit wyświetlacza;
- 5 – Amortyzowana rama montażowa;
- 6 – Zespół poboru powietrza TATS (nie widoczny na zdjęciu)



**Figure 3.** A monitor of chemical and radioactive contaminants CHERDES II [21]  
**Rycina 3.** Monitor of chemical and radioactive contaminations CHERDES II [21]

Explosives are most often detected by means of ion mobility spectrometry, with over 10,000 spectrometers currently operating in airports all over the world. Their use offers numerous advantages such as low operation costs, selectivity and a possibility of conducting analyses at atmospheric pressure. Additionally, these detectors are easy to use and their response time is below 7 seconds. In global terms, more than  $10^7$  analyses are performed to reveal the presence of explosives based on IMS [22].

Explosive substances are detected for negative polarisation. The following ions are usually generated at a temperature of  $100^{\circ}\text{C}$  and at atmospheric pressure:  $(\text{M}-1)^{-}$ ,  $\text{M}^{-}$ ,  $\text{NO}_2^{-}$ , their life-cycle being shorter than 1 ms. This is followed by hydrogen detachment, charge transfer or fragmentation. By adding halon or doping materials to the analyser, a reactive  $\text{Cl}^{-}$  ion is generated, which then gives rise to the following ions:  $\text{M}^{-}$  and  $\text{M}\cdot\text{Cl}^{-}(\text{H}_2\text{O})_n$  [23]. As can be noted, the product depends not only on the properties of the analyte molecule but also on the type of the carrier and addition of the reagent. By way of example, TNT (2,4,6-trinitrotoluene) detection can be described. In the course of analysis, mainly  $(\text{TNT}-\text{H})^{-}$  ions, derived from  $(\text{TNT}\cdot\text{O}_2)^{-}$  are generated in the air, with  $(\text{TNT}-\text{H})^{-}$  formed through hydrogen detachment caused by the attached  $\text{O}_2^{-}$ . The highest intensity for (TNT) is obtained for trinitrotoluene vapours with a concentration ( $\text{O}_2$ ) in nitrogen reaching 2% or less [24].

Wykrywanie materiałów wybuchowych jest najczęściej prowadzone przy użyciu spektrometrii ruchliwości jonów. Na świecie jest obecnie stosowane ponad 10 000 spektrometrów zabezpieczających pracę lotnisk. Ich użycie jest korzystne ze względu na niskie koszty, selektywność, jak również możliwość analizy pod ciśnieniem atmosferycznym. Dodatkowo detektory te nie są skomplikowane w użyciu, a czas odpowiedzi wynosi poniżej 7 sekund. Na świecie jest wykonywane ponad  $10^7$  analiz na obecność materiałów wybuchowych z wykorzystaniem IMS [22].

Substancje wybuchowe są wykrywane dla ujemnej polaryzacji. W temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  i pod ciśnieniem atmosferycznym zazwyczaj generowane są jony takie jak:  $(\text{M}-1)^{-}$ ,  $\text{M}^{-}$ ,  $\text{NO}_2^{-}$ , których czas życia jest krótszy niż 1 ms. Jony te ulegają później odłączeniu wodoru, przeniesieniu ładunku lub fragmentacji. Dodatek halonów lub dopantów do analizatora powoduje powstanie jonu reakcyjnego  $\text{Cl}^{-}$ , który będzie prowadził do powstania jonów  $\text{M}^{-}$  i  $\text{M}\cdot\text{Cl}^{-}(\text{H}_2\text{O})_n$  [23]. Jak można zauważyć, produkt nie zależy tylko od właściwości molekuly analitu, ale również od natury nośnika i dodatku reagentu. Dla przykładu można tu przedstawić wykrywanie TNT (2,4,6-trinitrotoluenu). W przypadku analizy w powietrzu będą powstawać głównie jony  $(\text{TNT}-\text{H})^{-}$  pochodzące od  $(\text{TNT}\cdot\text{O}_2)^{-}$ , gdzie  $(\text{TNT}-\text{H})^{-}$  jest utworzony przez oderwanie wodoru przez przyłączony  $\text{O}_2^{-}$ . Natomiast jeżeli pary trinitrotoluenu byłyby analizowane, gdy stężenie ( $\text{O}_2$ ) w azocie, uzyskalibyśmy najwyższą intensywność dla (TNT) [24].



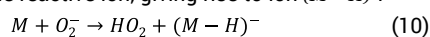
Most explosives belong to a group of nitro-compounds, characterised with strong electronegativity. As a result of chemical ionisation at atmospheric pressure, they generate negative ions, so their analysis based on IMS takes place at negative polarisation. The principal reactive ion will thus be  $O_2^-$ , which will be hydrated depending on the content of water vapour in the reactive gas. In the case of adding the reactive gas, alternative ions can be formed, such as  $Br^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  [25].

When analysing explosives in the negative mode, based on IMS, the following issues need to be considered [25]:

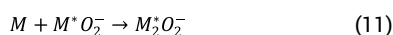
- a) reactions with charge transfer between sample molecule  $M$  and reactive ion  $O_2^-$ ; the reaction product may dissociate, giving rise to more stable  $F$ :



- b) reactions with proton transfer between the analyte molecule and the reactive ion, giving rise to ion  $(M-H)^-$ :



- c) reactions of dimerisation and clusterisation, becoming more significant with the growing concentration of the analyte:



In consequence, when analysing explosives, the following ion products can be expected to be generated by the principal input ion  $M \cdot O_2^- \cdot (H_2O)_2^-$ :

- |                                          |                            |
|------------------------------------------|----------------------------|
| – molecular ion:                         | $M^- \cdot H_2O$           |
| – adduct with ion $O_2^-$ :              | $M \cdot O_2^- \cdot H_2O$ |
| – ion remaining after proton detachment: | $(M-1) \cdot H_2O$         |
| – nitronium ion:                         | $NO_2^- \cdot H_2O$        |

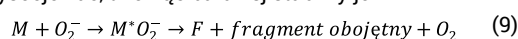
In detecting explosives, selected physical properties of these substances, along with chemical ones, play a decisive role, including in particular vapour pressure. The findings from analyses of selected explosive materials, conducted by means of the IONSCAN 500DT device, are presented in numerous studies [25–27].

IMS-based detectors, despite their obvious advantages (a light structure, short detection time, a satisfactory level of sensitivity) and operational parameters being constantly improved by producers, are still characterised with low specificity of measurements, which leads to frequent false positives. A contamination detection system, when generating false alerts, is likely to be approached with limited trust. For this reason, studies have been conducted in recent years with the aim of improving the IMS technique of contamination detection, by combining it with other technical solutions, one of which is FAIMS (field asymmetric ion mobility spectrometry). It is a combination of a spectrometer, generating an athwart field displaying high strength and frequency, and a classic IMS device. The use of an additional quick-change high-strength field facilitates ion segregation, thus increasing the device selectivity in the compounds detection process. Other studies are aimed at cascading FAIMS detectors with IMS devices [28].

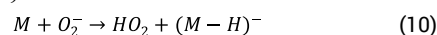
Większość materiałów wybuchowych należy do grupy nitrozwiązków, które charakteryzują się silną elektroujemnością. W wyniku jonizacji chemicznej pod ciśnieniem atmosferycznym tworzyć będą one jony ujemne. Ich analiza za pomocą IMS odbywać się będzie przy polaryzacji ujemnej. Wówczas podstawowym jonem reakcyjnym jest  $O_2^-$ , hydratowany w zależności od zawartości pary wodnej w gazie reakcyjnym. W przypadku domieszkowania gazu reakcyjnego powstawać mogą alternatywne jony, takie jak:  $Br^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  [25].

W przypadku analizy materiałów wybuchowych w trybie ujemnym za pomocą IMS należy rozpatrzyć między innymi [25]:

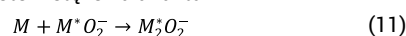
- a) reakcje z przeniesieniem ładunku między cząsteczką próbki  $M$  a jonem reakcyjnym  $O_2^-$ ; produkt reakcji może dysocjować, tworząc bardziej stabilny jon  $F$ :



- 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  $M \cdot O_2^- \cdot (H_2O)_2^-$ :

- |                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| – jonu cząsteczkowego:      | $M^- \cdot H_2O$           |
| – adduktu z jonem $O_2^-$ : | $M \cdot O_2^- \cdot H_2O$ |
| – jonu po odcięciu protonu: | $(M-1) \cdot H_2O$         |
| – jonu nitroniowego:        | $NO_2^- \cdot H_2O$        |

W detekcji materiałów wybuchowych, poza właściwościami chemicznymi, decydujące znaczenie będą mieć ich wybrane właściwości fizyczne. Będzie to przede wszystkim prężność par. Wyniki badań wytypowanych materiałów wybuchowych za pomocą spektrometru IONSCAN 500DT zaprezentowano w pracach [25–27].

Detektory oparte o technikę IMS, mimo wielu zalet (mała masa, krótki czas detekcji, zadowalająca czułość) oraz ulepszeniu parametrów użytkowych przez producentów, cechują się ciągle niską swoistością pomiarów objawiającą się generowaniem fałszywych wskazań. Powoduje to ograniczenie zaufania do systemu wykrywania skażeń, który może wygenerować niepotrzebny alarm. Z tego też powodu w ostatnich latach prowadzi się badania nad ulepszeniem techniki IMS w wykrywaniu skażeń przez połączenie jej z innymi rozwiązaniami technicznymi. Przykładem jest technika FAIMS, która jest połączeniem spektrometru generującego poprzeczne pole o wysokim natężeniu oraz częstotliwości z klasycznym spektrometrem IMS. Dzięki zastosowaniu dodatkowego, szybkozmiennego pola o dużym natężeniu możliwa jest segregacja przepływających jonów, przez co zwiększa się selektywność przyrządu w wykrywaniu związków. Prowadzone są także badania nad połączeniem kaskadowym detektora FAIMS z detektorem IMS [28].

Along with IMS, chemical contaminants are also detected by means of differential ion mobility spectrometry (DMS) combined with an IMS device or with a mass spectrometer (IMS-MS or DMS-MS).

## Differential ion mobility spectrometry (DMS)

Differential ion mobility spectrometry is an extension of the IMS method. It was previously referred to as field asymmetric ion mobility spectrometry (FAIMS). This method uses the strong and variable electric field, its essence being to force oscillatory ion mobility within the spectrometer. This finally leads to a spectrogram (spectrum) of compensation voltage being analysed rather than a spectrogram of drift time (as in the case of the IMS technique).

### DMS device structure

The spectrometer features the following elements (Figure 4):

- the ionisation source – radioactive source  $\alpha$  or  $\beta$ , usually nickel isotope  $^{63}\text{Ni}$ ,
- two opposite plates with electrodes attached (at a distance from 0.1 to 0.5 mm) and high-voltage applied, between 10 kV/cm and 50 kV/cm (often even higher), with frequency adjusted to the distance between the electrodes and the HSV,
- a compensatory electric field generated between two conductors [29].

### DMS device operation

Ion mobility change induced by a high electric field constitutes the major difference between the DMS and IMS techniques, and also the principle providing the basis for the DMS device operation.

The impact of an electric field of up to 12 kV/cm is rather insignificant, but above that value a significant dependence of ion mobility on field strength is observed. Some ions display increased mobility while for others (usually heavier ones) decreased mobility can be seen.

Oprócz metody IMS w wykrywaniu skażeń chemicznych wykorzystuje się także technikę różnicowej spektrometrii jonów (DMS) sprzężonej ze spektrometrem IMS lub spektrometrem mas (IMS-MS lub DMS-MS).

## Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów (DMS)

Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów DMS (ang. Differential Ion Mobility Spectrometry) jest rozwinięciem metody IMS. Wcześniej różnicowa spektrometria ruchliwości jonów była nazywana spektrometrią ruchliwości jonów w polu asymetrycznym FAIMS. Metoda ta wykorzystuje silne, zmienne pole elektryczne, a jej istotą jest wymuszenie oscylacyjnego ruchu jonów w obszarze separatora. Ostatecznie do analizy otrzymujemy spektrogram (widmo) napięć kompensacyjnych, a nie spektrogram czasu dryftu (jak to miało miejsce w metodzie IMS).

### Budowa spektrometru DMS

W spektrometrze można wyróżnić następujące elementy (ryc. 4):

- źródło jonizacji – źródło  $\alpha$  lub  $\beta$  promieniotwórcze, zazwyczaj stosuje się izotop niklu  $^{63}\text{Ni}$ ,
- dwie przeciwległe płytki z naniesionymi na nie elektrodami (odległość od 0,1 do 0,5 mm), do których przyłożone jest wysokie napięcie 10 kV/cm do 50 kV/cm (często jeszcze większe) o częstotliwości dostosowanej do odległości pomiędzy elektrodami i napięcia HSV,
- między okładkami generuje się pole kompensacyjne [29].

### Zasada działania spektrometru DMS

Podstawową różnicą pomiędzy spektrometrią DMS a IMS i jednocześnie własnością, na której oparta jest zasada działania spektrometru DMS, jest zmiana ruchliwości jonów pod wpływem wysokiego pola elektrycznego.

Do ok. 12 kV/cm wpływ ten jest nieistotny, powyżej tej wartości zaczyna się pojawiać wyraźna zależność ruchliwości jonu od natężenia pola. Dla części jonów można zaobserwować wzrost ruchliwości, dla innych (zwykle ciężkich jonów) obserwujemy spadek ruchliwości.

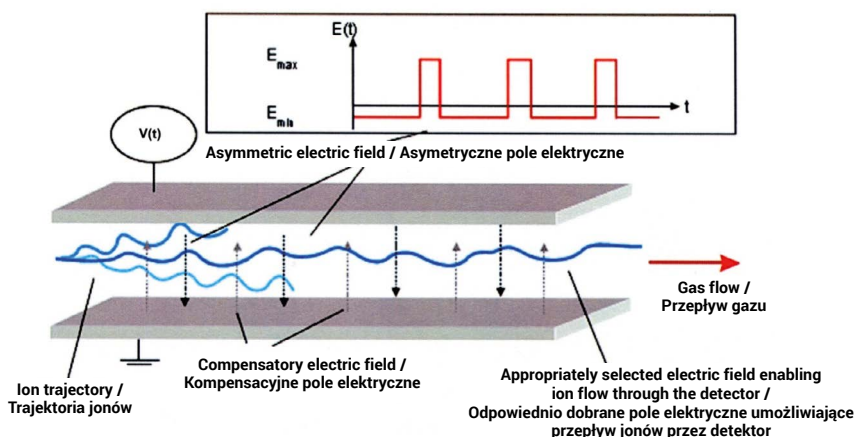


Figure 4. Asymmetric and compensatory electric field in the DMS spectrometer [30]

Rycina 4. Asymetryczne i kompensacyjne pole elektryczne w spektrometrze DMS [30]

The electric field generated between the electrodes is another significant parameter of the DMS device, the frequency of which is adjusted to the distance between the electrodes in order to achieve the following:

$$d < t_1 \cdot K(E/N) \cdot \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T}}{d} \quad (12)$$

where:  $d$  – distance between the electrodes,  $K(E/N)$  – mobility for field strength  $E$ , with gas molecule number  $N$  in  $1 \text{ cm}^3$ .

For a distance of 0.25 mm between the electrodes, a minimum frequency of 2 MHz is required.

The HSV waveform should be rectangular with non-symmetrical duty cycles (usually 30%).

During stage  $t_1$  the strength of field  $E_1$  is determined by equation (13), and during stage  $t_2$  the strength of field  $E_2$  corresponds to (14).

$$E_1 = \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T} + U_{CV}}{d} \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_1}{T} - U_{CV}}{d} \quad (14)$$

Only those ions for which the mobility difference between the low- and high-voltage fields is levelled off with the appropriate compensation voltage eventually reach the collecting electrode. If the generated HSV has a constant value, the CV value fluctuates from minus  $CV_{max}$  to plus  $CV_{max}$ , and a characteristic waveform is generated displaying a few peaks.

For a strictly defined HSV, the ionic current is determined for negative and positive ions within full CV range  $T_1$ , the obtained spectrograms are analysed and the characteristic points are recorded in a table. The subsequent data are recorded in a new table for a different value of HSV. The resulting waveform takes the form of a three-dimensional (3D) diagram.

In an ideal case, i.e. when the electrode's length tends to infinity and the coefficient of transversal diffusion equals 0, the following relationship can be described, with the ions reaching the collecting electrode.

$$K(1+\alpha_H) \frac{\left( U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T} + U_{CV} \right)}{d} \cdot t_1 = K(1+\alpha_L) \frac{\left( U_{HSV} \cdot \frac{t_1}{T} - U_{CV} \right)}{d} \cdot t_2 \quad (15)$$

For the purpose of this equation, ion transversal routes are determined for the low and high field intensities. If both routes are equal, the ions move towards the collecting electrode.

If ion mobility is the same in the low- and high-intensity electric fields, the ions do not move towards either of the electrodes but revolve around the central distance between them, towards the collecting electrode ( $\alpha = 0$ ). If a low-strength field is applied to the electrode, the ions move towards the lower elec-

Drugim istotnym parametrem spektrometru DMS jest pole elektryczne generowane pomiędzy elektrodami o częstotliwości dostosowanej do odległości pomiędzy tymi elektrodami tak, aby zachować zależność:

$$d < t_1 \cdot K(E/N) \cdot \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T}}{d} \quad (12)$$

gdzie:  $d$  – odległość pomiędzy elektrodami,  $K(E/N)$  – ruchliwość dla natężenia pola elektrycznego  $E$ , przy  $N$  liczbie cząsteczek gazu w  $1 \text{ cm}^3$ .

Dla odległości pomiędzy elektrodami równej 0,25 mm wymagana jest częstotliwość co najmniej 2 MHz.

Przebieg napięcia HSV powinien być przebiegiem prostokątnym o niesymetrycznym wypełnieniu zwykle 30%.

W fazie  $t_1$  wartość natężenia pola  $E_1$  jest określona zależnością (13), natomiast dla cyklu  $t_2$  wartość natężenia pola  $E_2$  jest określona zależnością (14).

$$E_1 = \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T} + U_{CV}}{d} \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{U_{HSV} \cdot \frac{t_1}{T} - U_{CV}}{d} \quad (14)$$

Do elektrody zbiorczej docierają tylko te jony, których różnica ruchliwości dla niskiego i wysokiego pola jest wyrównana odpowiednim napięciem CV (Compensation Voltage). W przypadku gdy generowane napięcie HSV ma stałą wartość, a napięcie CV zmienia się od minus  $CV_{max}$  do plus  $CV_{max}$ , powstaje charakterystyczny przebieg z pojawiającymi się pikami.

Dla ściśle określonego napięcia HSV określana jest wartość prądu jonowego dla jonów ujemnych i dodatnich dla pełnego okresu  $T_1$  napięcia CV. Uzyskane w ten sposób spektrogramy poddawane są analizie, a charakterystyczne punkty przebiegu są zapisywane w tablicy. Kolejne dane zapisywane są w nowej tablicy dla innej wartości HSV. Uzyskiwany w ten sposób przebieg ma charakter wykresu trójwymiarowego.

W idealnym przypadku, tzn. gdy długość elektrod dąży do nieskończoności i współczynnik dyfuzji poprzecznej równa się 0, można napisać zależność, przy której jony dochodzą do elektrody zbiorczej.

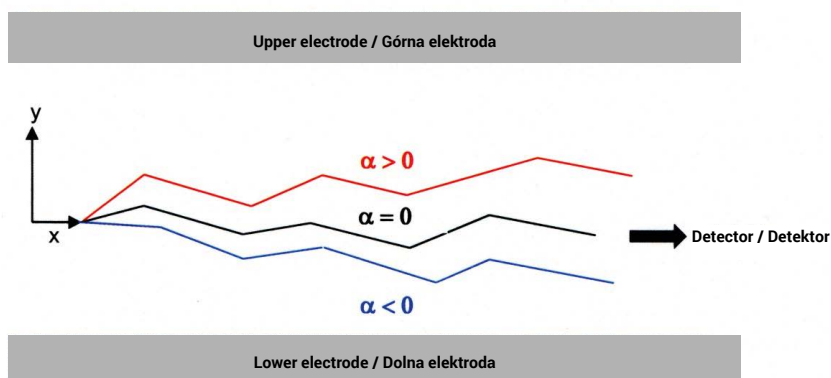
$$K(1+\alpha_H) \frac{\left( U_{HSV} \cdot \frac{t_2}{T} + U_{CV} \right)}{d} \cdot t_1 = K(1+\alpha_L) \frac{\left( U_{HSV} \cdot \frac{t_1}{T} - U_{CV} \right)}{d} \cdot t_2 \quad (15)$$

Dla tego równania wyznaczana jest droga poprzeczna jonu dla dużego i małego natężenia pola, gdy obie drogi są równe, wówczas jony przechodzą do elektrody zbiorczej.

Jeśli ruchliwość jonów jest taka sama w polu elektrycznym o małym i dużym natężeniu, wówczas jony nie przemieszczają się w kierunku żadnej z elektrod, tylko poruszają się blisko środka odległości między elektrodami w kierunku elektrody zbiorczej ( $\alpha = 0$ ). W czasie podania na elektrodę pola o małym natężeniu, wówczas jony poru-

trode ( $\alpha < 0$ ), and if a high-strength field is applied, they move towards the upper one ( $\alpha > 0$ ). Compensation voltage applied to the lower electrode prevents the ions from colliding with that electrode (Figure 5).

szają się w kierunku dolnej elektrody ( $\alpha < 0$ ). W czasie podania na elektrodę pola o dużym natężeniu jony przemieszczają się w kierunku górnej elektrody ( $\alpha > 0$ ). Napięcie kompensacyjne CV przyłożone do dolnej elektrody zapobiega zderzeniom jonów z elektrodą (ryc. 5).



**Figure 5.** Ion movement in the chamber depending on coefficient  $\alpha$  [31]  
**Rycina 5.** Ruch jonów w komorze w zależności od współczynnika  $\alpha$  [31]

#### DMS-based identification of substances

DMS devices can be used to identify substances based on:

- electric field-induced mobility changes – direct identification;
- peak disappearance or appearance, caused by ion disintegration;
- molecule disintegration point – the continuity of characteristic spectra in a 3D diagram.

#### Direct identification

The identification of detected substances is based on compensation voltage (CV). Figure 6 shows CV versus HSV for methyl salicylate (MS) and reactant ion peak (RIP).

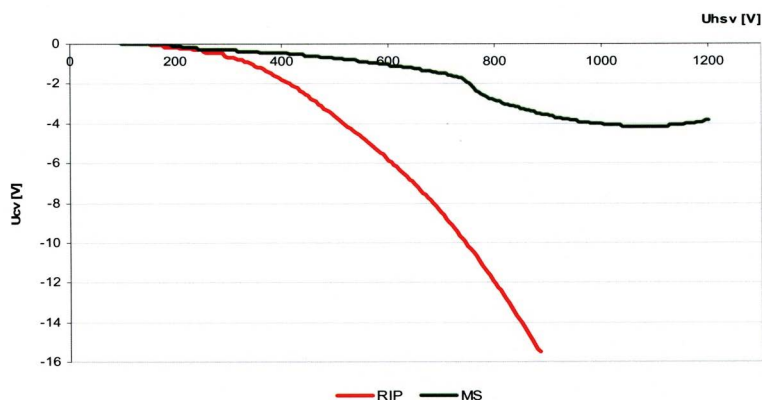
#### Identyfikacja badanej substancji za pomocą spektrometru DMS

Za pomocą spektrometru DMS substancje możemy identyfikować na podstawie:

- zmiany ruchliwości pod wpływem pola elektrycznego
- identyfikacja bezpośrednia;
- zaniku lub powstania piku, będącego efektem rozpadu jonu;
- punktu rozpadu cząsteczki – ciągłości charakterystycznych widm na wykresie 3D.

#### Identyfikacja bezpośrednia

Identyfikowanie rodzaju wykrywanej substancji dokonywane jest na podstawie napięcia kompensacyjnego CV. Wykres napięcia kompensacyjnego w funkcji napięcia HSV dla MS (salicylanu metylu) i RIP (Reactant Ion Peak) przedstawiono na rycinie 6.



**Figure 6.** Compensation voltage versus HSV for methyl salicylate [32]

**Rycina 6.** Wykres napięcia kompensacyjnego w zależności od napięcia HSV dla salicylanu metylu [32]

Immediate identification involves selecting several voltage values and verifying whether the peak occurs within a given CV. This identification method enables chemical substances to be detected within no more than a few seconds.

It takes 0.4 second to collect data for a particular value of HSV, and around 2.8 seconds for the whole data collection cycle (including the subsequent HVS values: 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 and 1200 V). Such an analysis can, therefore, be considered immediate identification.

Another, and perhaps more accurate, method is to perform scanning for the full HSV range (from 100 to 1200 V) and to determine mean squared deviation from the third-order polynomial function, established through the scaling process for the substance being identified.

$$f(x)=a \cdot HSV^3+b \cdot HSV^2+c \cdot HSV+d \quad (16)$$

Identyfikacja natychmiastowa polega na wybraniu kilku napięć i sprawdzeniu, czy pojawia się pik w określonym zakresie napięć CV. Taki sposób identyfikacji substancji chemicznych umożliwia ich wykrycie się w ciągu kilku sekund.

Dla jednej wartości napięcia HSV czas zbierania danych wynosi 0,4 s, wobec czego przy pomiarze dla kilku kolejnych wartości napięć HSV: 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 i 1200 V pełny cykl zbierania danych wymaga czasu ok. 2,8 s, co w przypadku takiej analizy można uznać za identyfikację natychmiastową.

Drugim dokładniejszym sposobem jest wykonanie skanowania dla pełnego zakresu napięć HSV (od 100 do 1200 V) i określenie odchylenia średniokwadratowego od funkcji, będącej wielomianem 3-go stopnia wyznaczonym w procesie skalowania dla identyfikowanej substancji.

$$f(x)=a \cdot HSV^3+b \cdot HSV^2+c \cdot HSV+d \quad (16)$$

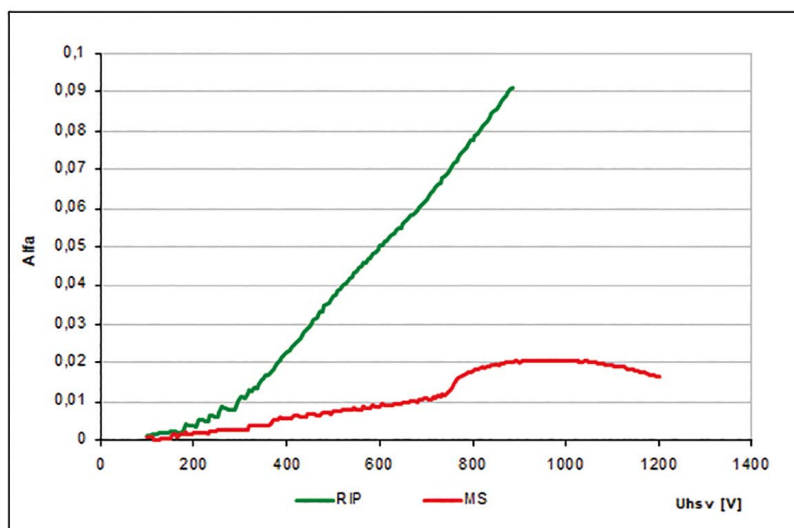


Figure 7. Dependence of coefficient  $\alpha$  for MS and RIP on HSV [32]  
Rycina 7. Zależność współczynnika  $\alpha$  dla MS i RIP od napięcia HSV [32]

The determined dependence of mobility changes on the electric field forms the basis for methyl salicylate identification. The goodness of fit is used as an indicator of standard deviation of measurement points from the curve recorded in the scaling process.

#### Identification based on the disintegration points of the analysed vapours and gases, and discontinuity of the measured data

DMS often results in increased ion energy, which leads to ion disintegration into lighter pieces. This may take the form of the neutral molecule detaching from the cluster or a part of the molecule chain coming off.

Wyznaczona zależność zmiany ruchliwości od pola elektrycznego jest podstawą do identyfikacji salicylanu metylu. Miarą odchylenia standardowego punktów pomiarowych od krzywej zarejestrowanej w procesie skalowania stanowi stopień dopasowania.

#### Identyfikacja na podstawie punktów rozpadu analizowanych par i gazów oraz nieciągłości w danych pomiarowych

Spektrometria DMS często powoduje zwiększenie energii jonów, czego skutkiem jest rozpad jonu na fragmenty lżejsze. Czasami jest to odłączenie z klastra cząsteczki neutralnej, a czasami oderwanie części łańcucha cząsteczki.

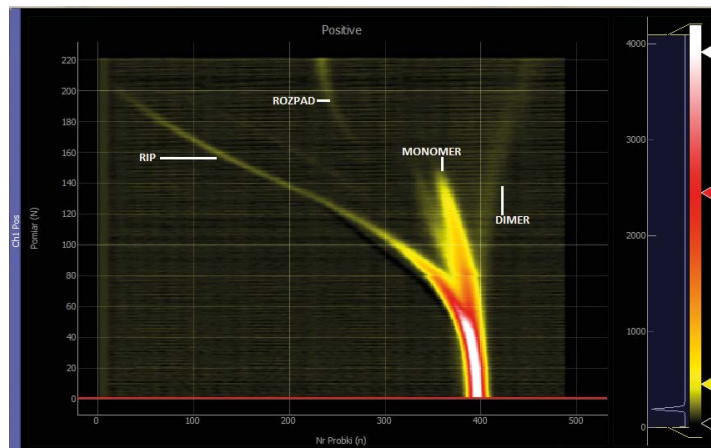


Figure 8. 1 ppm ethanol spectrum with a disintegration point [33]  
Rycina 8. Widmo etanolu o stężeniu 1 ppm z punktem rozpadu [33]

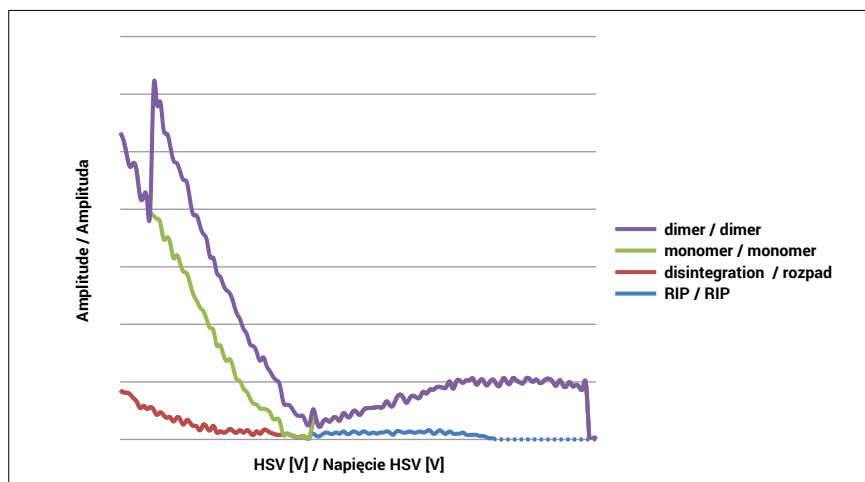


Figure 9. Absolute amplitudes for ethanol at a concentration of 1 ppm [33]  
Rycina 9. Amplitudy bezwzględne dla etanolu o stężeniu 1 ppm [33]

The spectrogram recorded for ethanol clearly shows monomer and dimer peaks. Dimer disintegration into the monomer is observed, followed by monomer disintegration. The appearing disintegration peak and the disappearing monomer peak, as presented in the above figures, make it possible to determine the moment of alcohol molecule disintegration, and the higher the HSV, the bigger the disintegration peak amplitude.

#### Practical domestic solutions

PR51-W is a device using the DMS technique for detecting chemical contamination (including explosives) and radioactive contamination, the latter being subject to probes disconnection. The device is characterised with high resolution (around  $R = 60$ ), high selectivity, a short measurement cycle of around 5 seconds, high sensitivity (below  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for par-

Na spektrogramie zarejestrowanym dla etanolu wyraźnie widać piki pochodzące od monomeru i dimeru. Obserwowany rozpad dimeru na monomer, a w dalszej konsekwencji rozpad monomeru. Powyższe wykresy pozwalają na określenie momentu rozpadu cząsteczki alkoholu poprzez obserwację pojawienia się piku rozpadu oraz zaniku piku pochodzącego od monomeru. Amplituda piku pochodzącego od rozpadu jest tym większa im wyższe jest napięcie HSV.

#### Krajowe rozwiązania praktyczne

PR51-W jest przykładem urządzenia wykorzystującego technikę DMS do wykrywania skażeń chemicznych, w tym materiałów wybuchowych, a po odłączeniu sond do wykrywania skażeń promieniotwórczych. Urządzenie to charakteryzuje się wysoką rozdzielczością (ok.  $R = 60$ ), wysoką selektywnością oraz krótkim cyklem pomiarowym, który wynosi ok. 5 s, wysoką czułością

alytic-convulsive CWAs, below 200 µg/m<sup>3</sup> for burning CWAs, and below TLVs for TICs), and a short response time of around 20 seconds.

The DMS PRS-1W steering system parameters (developed at WICHiR) include [29]:

- HSV generator frequency – 3 MHz,
- peak-to-peak amplitude – 100–1200 V,
- maximum achievable electric field strength – 35 kV/cm,
- maximum normalised electric field strength (E/N) – 160 Td,
- gas flow through the detector – 3 l/min.

(czułość poniżej 20 µg/m<sup>3</sup> dla paralityczno-drgawkowych BST i poniżej 200 µg/m<sup>3</sup> dla parzących BST, poniżej wartości NDS dla TSP) oraz krótki czas odpowiedzi, to jest ok. 20 s.

Przykładowe parametry układu sterującego spektrometrem DMS PRS-1W (opracowany w WICHiR) [29]:

- częstotliwość generatora HSV – 3 MHz,
- zakres amplitudy napięcia (peak to peak) 100–1200 V,
- maksymalne uzyskiwane natężenie pola elektrycznego – 35 kV/cm,
- maksymalne znormalizowane natężenie (E/N) pola elektrycznego – 160 Td,
- przepływ gazu przez detektor – 3 l/min.



Figure 10. Automatic gas monitor PRS-1W [34]  
Rycina 10. Automatyczny sygnalizator gazu PRS-1W [34]

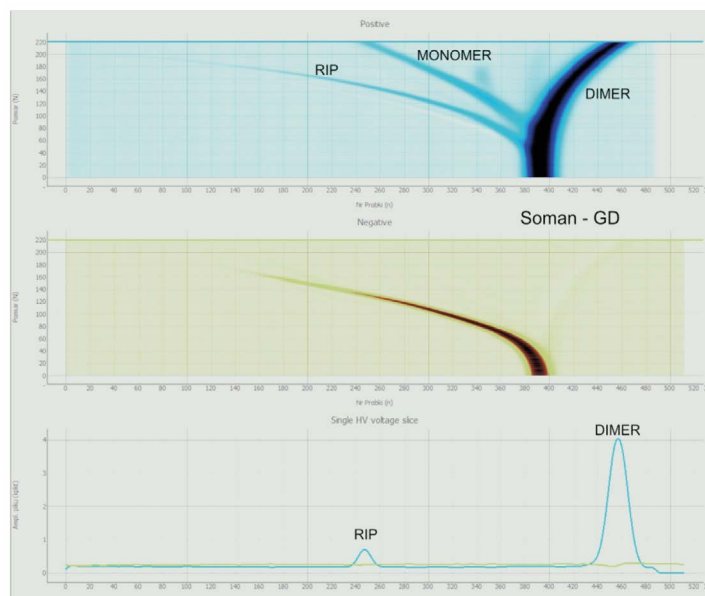
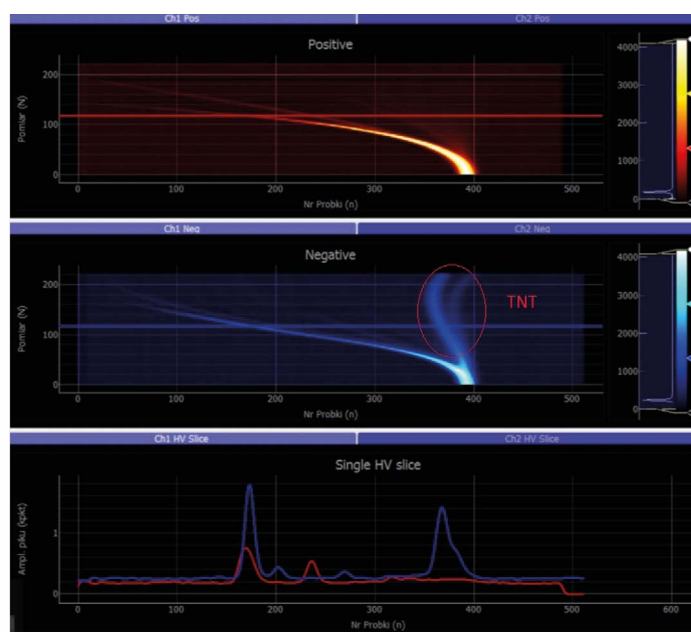


Figure 11. A spectrogram recorded for soman at a concentration of 90 µg/m<sup>3</sup> [35]  
Rycina 11. Spektrogram somanu 90 mg/m<sup>3</sup> [35]



**Figure 12.** A spectrogram recorded for TNT [36]  
**Rycina 12.** Spektrogram zarejestrowany dla TNT [36]

Figures 11 and 12 present the spectrograms of soman and trotyl, respectively, recorded by means of PRS-1W, in real time, for both positive and negative ions.

Along with typical CWAs, analyses were also conducted on toxic industrial chemicals containing chlorine ( $\text{Cl}_2$ ).

The presented examples lead to the conclusion that gas analyses are much more accurate (even in the presence of VOCs as interfering substances) in calculating gas mobility and coefficient  $\alpha$ .

Contemporary diagnostic and treatment methods are based on the identification of symptoms which, unfortunately, frequently indicate an advanced stage of the disease. The air exhaled by humans contains thousands of volatile organic compounds which can act as potential biomarkers of diseases or pathologies. Investigations focused on assessing the exhaled air content are aimed at detecting biomarkers – characteristic substances which could facilitate the diagnosis of such medical conditions as diabetes, kidney diseases or cancer. Exhaled air analyses are also expected to provide additional information on medications taken, stimulants used or diets followed [37].

High sensitivity of DMS-based detectors has encouraged researchers to investigate the potential use of such detectors in medical diagnostics, for instance, in detecting lung and kidney diseases, and diabetes [38].

## Summary

Contamination with hazardous chemical substances poses a serious hazard both to the natural environment and to human health and life. Measures aimed at mitigating the consequences

Na rycinie 11 przedstawiono spektrogram somanu, a na rycinie 12 spektrogram trotylu zarejestrowany przez przyrząd PRS-1W w czasie rzeczywistym dla jonów dodatnich i ujemnych.

Oprócz typowych BST przeprowadzono także badania na toksycznych środkach przemysłowych na przykładzie chloru ( $\text{Cl}_2$ ).

Z przytoczonych opisów można wnioskować, że analiza gazu jest dużo precyzyjniejsza (nawet w obecności substancji zakłócających – VOCs) przy zastosowaniu do obliczeń ruchliwości gazu oraz współczynnika  $\alpha$ .

Współczesne metody diagnostyki i leczenia oparte są na identyfikowaniu objawów, które w wielu przypadkach świadczą o zaawansowanym już stadium choroby. Powietrze wydychane przez człowieka zawiera tysiące lotnych związków organicznych, które mogą stanowić potencjalne biomarkery chorób lub zmian patogennych. Badania związane z oceną składu wydychanego powietrza zmierzają do znalezienia w wydychanym przez człowieka powietrzu biomarkerów – charakterystycznych substancji, pomocnych w diagnozowaniu takich schorzeń, jak: cukrzyca, choroby nerek czy nowotwory. Dodatkowo analiza oddechu może dostarczyć informacji o stosowanych lekach, używkach czy rodzaju diety [37].

Wysoka czułość czujnika opartego o DMS skłoniła do rozpoczęcia prac nad zastosowaniem czujnika w diagnostyce medycznej, np. do wykrywania chorób płuc, nerek oraz cukrzycy [38].

## Podsumowanie

Skażenia niebezpiecznymi środkami chemicznymi stanowią poważne zagrożenia dla środowiska naturalnego oraz dla zdrowia i życia ludzi. Działania polegające na zminimalizowa-



of such incidents require their prompt detection and identification. In the event of a chemical contamination threat, in addition to having highly sensitive equipment, it is vital to provide the fastest contamination response possible. Detectors based on the IMS technique for contamination reconnaissance and identification are likely to materially increase the operational efficiency of both the systems of contamination detection utilised by the Military Forces of the Republic of Poland and other sub-systems forming part of the Polish National System of Contamination Detection and Alerting. Such detectors can be mounted in fire engines, serving the purpose of direct threat identification. They can also be used as elements of contamination monitoring systems operated by crisis management teams. Detectors based on IMS (DMS) facilitate prompt detection of a wide range of threats with high sensitivity and much better selectivity. They can also be installed in fire engines and unmanned direct threat identification platforms, or form part of contamination monitoring systems operated by crisis management teams.

## Conclusions

1. Contamination threats in the territory of the Republic of Poland are on an upward trend. The entities included in the National System of Contamination Detection and Alerting should be prepared, in both technical and procedural terms, for conducting reconnaissance and initial identification of contaminants at the place of their occurrence.
2. The system is equipped with IMS devices. According to global trends, these devices should be successively replaced with solutions providing better sensitivity and selectivity. New devices could be based on differential mobility spectrometry. This solution should apply to portable and transportable instruments.
3. The application of new technical solutions should be accompanied by the unification of the system in the area of contamination reconnaissance and the creation of cooperation plans, which would have a significant impact on the safety of people and infrastructure.

## List of abbreviations

KCWA	– chemical weapon agent (G-paralysing-convulsive; H-necrotising): tabun (GA), sarin (GB), soman (GD), sulphur yperite (H), lewisite (L)
CBRN	– chemical, biological, radiological and nuclear
DMS	– differential ion mobility spectrometry
ECD	– electron capture detector
FAIMS	– field asymmetric ion mobility spectrometry
KSWSiA	– National System of Contamination Detection and Alerting
IMS	– ion mobility spectrometry
<sup>63</sup> Ni	– nickel isotope

niu skutków tych skażeń polegają na ich szybkim wykryciu i zidentyfikowaniu. W sytuacji wystąpienia zagrożenia skażeniami chemicznymi, obok bardzo wysokiej czułości sprzętu, wymagana jest również najwyższa szybkość reakcji na skażenia. Wykorzystanie detektorów opartych o technikę IMS do rozpoznania i identyfikacji skażeń w znacznym stopniu zwiększy efektywność działania nie tylko SWS SZ RP, ale także innych podsystemów KSWSiA. Detektory mogą być zastosowane w wozach straży pożarnej do identyfikacji bezpośrednich zagrożeń, mogą również być zastosowane jako element dla systemów monitoringu skażeń grup zarządzania kryzysowego. Detektory IMS (DMS) mogą zapewnić możliwość szybkiego wykrywania szerokiej gamy zagrożeń z dużą czułością i znacznie większą selektywnością oraz możliwość montowania w wozach straży pożarnej lub na bezzałogowych platformach do identyfikacji bezpośrednich zagrożeń, mogą również być zastosowane jako element dla systemów monitoringu skażeń grup zarządzania kryzysowego.

## Wnioski

1. Zagrożenia skażeniami terytorium RP mają tendencję zwyżkową. Podmioty wchodzące w skład Krajowego Systemu Wykrywania Skażeń i Alarmowania powinny być przygotowane, pod względem technicznym i proceduralnym, na prowadzenie rozpoznania i wstępnej identyfikacji skażeń w miejscu ich występowania.
2. System wyposażony jest w urządzenia wykorzystujące spektrometrię IMS. Zgodnie z trendami światowymi, urządzenia te powinny być sukcesywnie zastępowane rozwiązaniami cechującymi się lepszą czułością i selektywnością. Takimi urządzeniami mogłyby być przyrządy oparte o spektrometrię DMS. Dotyczy to przyrządów przenośnych i przewoźnych.
3. Wprowadzeniu nowych rozwiązań technicznych powinno towarzyszyć ujednoczenie systemu w zakresie rozpoznania skażeń, stworzenie planów współdziałania, a to miałyby istotny wpływ na bezpieczeństwo ludzi i infrastruktury.

## Wykaz skrótów

BST	– bojowe środki trujące (G – paralityczno-drgawkowe; H-nekrozuujące): tabun (GA), sarin (GB), soman (GD), iperyt siarkowy (H), lizyzt (L)
CBRN	– chemiczna, biologiczna, radiologiczna i nuklearna
DMS	– różnicowa spektrometria ruchliwości jonów
ECD	– detektor wychwytu elektronów
FAIMS	– asymetryczna spektrometria ruchliwości jonów w terenie
KSWSiA	– Krajowy System Wykrywania Skażeń i Alarmowania

NATO	– North Atlantic Treaty Organization	IMS	– spektrometria ruchliwości jonów
TLV	– threshold limit value	<sup>63</sup> Ni	– izotop niklu
NMR	– nuclear magnetic resonance	NATO	– Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego
SFB	– State Fire Brigade	NDS	– najwyższe dopuszczalne stężenie
MF RP	– Military Forces of the Republic of Poland	NMR	– spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego
TNT	– 2,4,6-trinitrotoluene (trotyl)	PSP	– Państwa Straż Pożarna
TIC	– toxic industrial chemical	SZ RP	– Siły Zbrojne Rzeczypospolitej Polskiej
WICHiR	– Military Institute of Chemistry and Radiometry	TNT	– 2,4,6 trinitrotoluen (trotyl)
VOCs	– volatile organic compounds	TSP	– toksyczne środki przemysłowe
		WICHiR	– Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii
		VOCs	– lotne związki organiczne

## Literature / Literatura

- [1] Obrona przed bronią masowego rażenia w operacjach połączonych. DD/3.8(A), Ministerstwo Obrony Narodowej, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Sygn. Szkol. 869/2013, Bydgoszcz 2013.
- [2] Starostin L., Witkiewicz Z., Neffe S., *Analiza Środków Trujących: współczesne wojskowe metody i środki detekcji i rozpoznania skażeń chemicznych*, WAT, Warszawa 1995.
- [3] Cygański A., *Metody spektroskopowe w chemii analitycznej*, wyd. 4 rozszerzone, WNT, Warszawa 2009.
- [4] Mäkinen M. A., Anttalainen O. A., Sillanpää M. E. T., *Ion Mobility Spectrometry and Its Applications in Detection of Chemical Warfare Agents*, „Analytical Chemistry” 2010, 82, 23, 9594–9600, <https://doi.org/10.1021/ac100931n>.
- [5] Kanu A. B., Hill H. H. Jr, Gribb M. M., Walters., R. N., *A small subsurface ion mobility spectrometer sensor for detecting environmental soil-gas contaminants*, „Journal of Environmental Monitoring” 2007, 9, 51–60, <https://doi.org/10.1039/B610493B>.
- [6] Keller T., Schneider A., Tutsch-Bauer E., Jaspers J., Aderjan R., Skopp G., *Ion Mobility Spectrometry for the Detection of Drugs in Cases of Forensic and Criminalistic Relevance*, „International Society for Ion Mobility Spectrometry” 1999, 22–34.
- [7] 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” 2001, 54, 515–529, [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00565-8](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00565-8).
- [8] Puton J., *Procesy jonizacji analitu i transportu jonów w spektrometrii ruchliwości jonów*, <http://chem.pg.edu.pl/documents/>, [dostęp: 03.2019].
- [9] Skowron M., Grabowska-Polanowska B., Faber J., Śliwka I., *Zarys metod analitycznych w badaniach oddechu dla celów diagnostyki medycznej*, Kraków 2012, 91–97.
- [10] Maziejuk M., Harmata W., *Spektrometr ruchliwości jonów, jako element do wykrywania wysokotoksycznych substancji chemicznych*, „Przemysł Chemiczny” 2006, 85/7, 1–5.
- [11] Fliszkiewicz B., *Badania zależności kalibracyjnych dla różnicowego detektora IMS*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2015.
- [12] Eiceman G. A., Karpas Z., *Ion Mobility Spectrometry*, Boca Raton 2005, <https://doi.org/10.1201/9781420038972>.
- [13] Maziejuk M., *Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów*, WAT, Warszawa 2012.
- [14] Sferopoulos R., *A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Commercial-Off-The-Shelf Items*, Australian Government, Department of Defence, Australia 2009.
- [15] Longworth T. L., Ong K. Y., *Domestic preparedness program: testing of the cam-chemical agent monitor (type I) against chemical warfare agents. Summary report*, Maryland 2001.
- [16] [https://www.bruker.com/products/mr.html?gclid=E-A1a1QobChMIusP0r5f14AIV20WaCh3TngYREAAAYASA-AEgJScvD\\_BwE](https://www.bruker.com/products/mr.html?gclid=E-A1a1QobChMIusP0r5f14AIV20WaCh3TngYREAAAYASA-AEgJScvD_BwE), [dostęp: 03.2019].
- [17] Baranoski J. M., Longworth T. L., *Domestic preparedness program evaluation of the raid-m (bruker saxonian analytik gmbh rapid alarm and identification device – monitor) against chemical warfare agents. Summary report*, 2003, <https://doi.org/10.21236/ADA430799>.
- [18] Operator’s manual Improved Chemical Agent Monitor (ICAM), Headquarters Department of the Army 1998.

- [19] <https://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ims/raid-m-100/overview.html>, [dostęp: 03.2019].
- [20] Instrukcja obsługi. Sygnalizator skażeń chemicznych i promieniotwórczych „CHERDES II” Pimco, Warszawa 2009.
- [21] <http://www.pimco.pl/en/products/gid-3-chemical-agent-detector/>, [dostęp: 03.2019].
- [22] Eiceman G.A., Karpas Z., Hill H. H. Jr., *Ion Mobility Spectrometry*, CRC Press, Boca Raton FL 1993.
- [23] Eiceman G.A., Krylov E.V., Krylova N.S., *Separation of Ions from Explosives in Differential Mobility Spectrometry by Vapor-Modified Drift Gas*, „Analytical Chemistry” 2004, 76, 17, 4937–4944, <https://doi.org/10.1021/ac035502k>.
- [24] Eiceman G.A., Karpas Z., Hill H. H., *Ion Mobility Spectrometry, Third Edition*, CRC Press, Boca Raton FL 2013, <https://doi.org/10.1201/b16109>.
- [25] Szczurek M., *Nowoczesne metody wykrywania materiałów wybuchowych w służbie bezpieczeństwa publicznego*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, BiTP Vol. 39 Issue 3, 2015, pp. 149–159.
- [26] <http://www.pimco.pl/products/stacjonarny-wykrywacz-materialow-wybuchowych-ionscan-500dt/>, [dostęp: 03.2019].
- [27] Szczurek M., *Wykrywanie materiałów wybuchowych przy użyciu spektrometrii ruchliwości jonów*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2013, 30–36.
- [28] Mierczyk Z., Ostrowski R. (red.), *Ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń*, Praca zbiorowa, tom 2, WAT, Warszawa 2001.
- [29] Maziejuk M., *Różnicowa spektrometria ruchliwości jonów*, WAT, Warszawa 2012.
- [30] Maziejuk M., Lisowski W., Szyposzyńska M., Sikora T., Zalewska A., *Differential ion mobility spectrometry in application to the analysis of gases and vapors*, „Solid State Phenomena” 2015, Vol. 223, 283–290, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP223.283>.
- [31] Tam M., Dutta P., Hill H. H. Jr., *Miniaturized Ion Mobility Spectrometry*, w: *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, Springer, Boston 2008, 1368–1376, [https://doi.org/10.1007/978-0-387-48998-8\\_1034](https://doi.org/10.1007/978-0-387-48998-8_1034).
- [32] Pliszka M., *Badania możliwości wykrywania i analizy par acetonu za pomocą detektora DMS*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2015.
- [33] Jakubowski M., *Badanie fragmentacji cząsteczek wybranych alkoholi w komorze różnicowego spektrometru ruchliwości jonów*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2016.
- [34] Jakubowska M., Maziejuk M., Ceremuga M., Siczek J., Gallewicz W., *Ceramic DMS – type detector*, „International Journal of Ion Mobility Spectrometry” 2012, <https://doi.org/10.1007/s12127-012-0093-1>.
- [35] Sikora T., Maziejuk M., Ceremuga M., Buczkowska A., *Technologie mobilne w polowej identyfikacji zagrożeń biologicznych*, w: *Mobilne laboratorium do poboru próbek środowiskowych i identyfikacyjnych zagrożeń biologicznych* J. Kocik, J. Dziuban, A. Górecka (red.), Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [36] Hofman M., *Badanie wpływu dopantów na wykrywanie 2,4,6-trinitrotoluenu (TNT) za pomocą różnicowego spektrometru ruchliwości jonów*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2016.
- [37] Skowron M., Grabowska-Polanowska B., Faber J., Śliwka I., *Zarys metod analitycznych w badaniach oddechu dla celów diagnostyki medycznej*, Kraków 2012.
- [38] Ceremuga M., Harmata W., Wertek K., Wiktoro M., *Oznaczanie acetonu w wydychanym powietrzu za pomocą różnicowej spektrometrii ruchliwości jonów*, „Przemysł Chemiczny” 2016, 95/1, 93–97, <https://doi.org/10.15199/62.2016.1.15>.

**WŁADYSŁAW HARMATA, ASSOCIATE PROFESSOR, D.SC. ENG.**

– in 1978 graduated from the Faculty of Chemistry and Technical Physics at the Military University of Technology (MUT) in Warsaw. He is currently holding the position of professor at the Faculty of Advanced Technologies and Chemistry, MUT (specialisation – ecology, threat elimination, protection against contaminants). He has co-authored nine domestic patents and twenty implementations of new studies for the Military Forces of the Republic of Poland (whose results have been published in some 340 original scientific studies). He has also authored seven monographs and academic course books.

**DR HAB. INŻ. WŁADYSŁAW HARMATA** – w 1978 roku ukończył studia na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Pracuje na stanowisku profesora na Wydziale Nowych Technologii i Chemii tej uczelni (specjalność – ekologia, likwidacja skażeń, ochrona przed skażeniami). Jest współautorem 9 patentów krajowych oraz 20 wdrożeń nowych opracowań do Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (wyniki badań zostały opublikowane w około 340 oryginalnych pracach naukowych), a także autorem 7 monografii i podręczników akademickich.