

© Группа авторов, 2010
УДК 681.785.235:662.2

Приборный комплекс для обнаружения и распознавания взрывчатых веществ на основе спектрометра подвижности ионов

¹ Кумпаненко И. В. *, ¹ Рошин А. В., ¹ Эпинатьев И. Д., ¹ Блошенко А. В.,
¹ Иванова Н. А., ² Ковалёв А. В.

¹ Учреждение Российской академии наук Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН

² Научно-производственный центр антитеррористической и криминалистической техники
НПЦ «СПЕКТР-АТ»

Разработан макетный образец приборного комплекса для обнаружения и распознавания взрывчатых веществ, в состав которого входят спектрометр подвижности ионов, блок пробоподготовки, модуль управления работой спектрометра с обратной связью, модуль обработки спектров и анализа полученной информации с применением специальных алгоритмов оценки вероятностей достоверного обнаружения ВВ и ложного срабатывания системы. Проведены лабораторные испытания приборного комплекса СПИ по обнаружению и распознаванию 28 наименований взрывчатых веществ из классов нитросоединений, нитроаминов, эфиров азотной кислоты, солей азотной кислоты и пр. Показано, что вероятность достоверного обнаружения критической массы ВВ $\geq 97\%$, а вероятность ложных тревог срабатывания при обнаружении ВВ $\leq 5\%$.

Ключевые слова: *спектроскопия подвижности ионов, обнаружение и распознавание взрывчатых веществ.*

Pilot device for detection and recognition of explosives equipped with ion mobility spectrometer (IMS), sampler, IMS management unit with back coupling, spectra treatment unit supplied by estimation algorithm of reliable explosives determination and false alarm has been developed. Pilot device was tested in the course of detection and recognition of 28 explosives from chemical classes: nitrocompounds, nitroamines, nitric acid ethers, salts etc. It was shown that probabilities of reliable explosives determination and false alarm are $\geq 97\%$ and $\leq 5\%$, respectively.

Key words: *ion mobility spectroscopy, explosives detection and recognition.*

Введение

Возросшая угроза терроризма в мире и необходимость адекватного ответа на нее заставляют совершенствовать технические средства обнаружения и распознавания взрывчатых веществ (ВВ). При этом одним из наиболее важных мероприятий является организация контроля перемещения и хранения ВВ. С этой

целью таможенные терминалы в аэропортах, пункты контроля на железных дорогах и авто-трассах, временные склады и перевалочные хранилища должны быть оснащены техническими средствами такого контроля.

Важно отметить, что наряду со средствами стационарного контроля, к которым относятся крупногабаритные дорогостоящие приборы, большой интерес представляют недорогие пор-

*Контакты: 119997, г. Москва, ул. Косыгина, 4. ИХФ РАН им. Н. Н. Семёнова. Тел./факс: (495) 939-71-18.
E-mail: ivkumpan@chph.ras.ru.

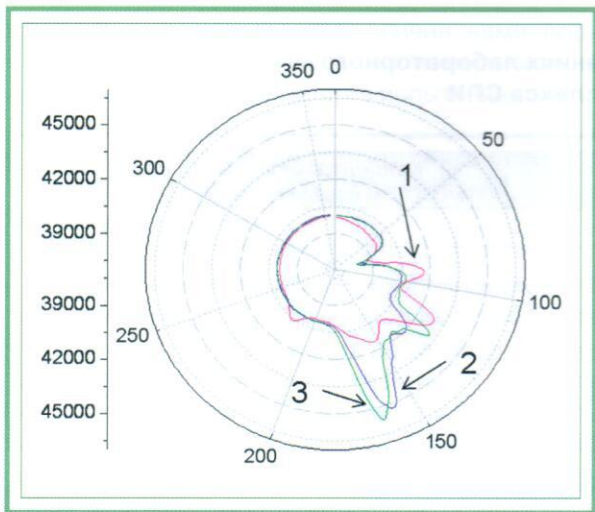


Рис. 4. Круговые диаграммы:
1 — ТНТ, 2 — нитроманит, 3 — гексоген

чувствительность приборного комплекса СПИ, то есть концентрацию паров ВВ в воздухе, при которой возможно обнаружение и распознавание ВВ.

Математическая обработка с помощью специальной программы — аналога программы VaporPrint™ круговых диаграмм образов, полученных в ходе независимых измерений одного и того же ВВ, дала возможность произвести экспериментальную оценку эффекта распознавания, вероятностей срабатывания и других информационных признаков приборного ком-

плекса СПИ. Использование математического аппарата, кратко описанного выше, позволило с помощью вышеприведённых формул (1) и (2) рассчитать вероятности достоверного обнаружения критической массы взрывчатого вещества и вероятности ложных тревог срабатывания индикации обнаружения ВВ.

Эти величины, полученные в ходе испытания приборного комплекса СПИ, для всех ВВ, использованных в ходе испытаний, сведены в табл. 3.

В ходе испытаний большое внимание уделялось рассмотрению и анализу информационных признаков, которые могут быть получены при работе отдельных элементов приборного комплекса СПИ. В частности, такими признаками являются возможности метода:

- формировать относительную величину сигнала о возможном обнаружении ВВ для учёта в общем правиле принятия решения;
- формировать сигнал о расположении в досматриваемом багаже предметов, подозрительных на наличие ВВ или взрывных устройств;
- формировать сигнал, соответствующий степени подозрения на наличие ВВ;
- учитывать в работе информационные признаки, полученные от других досмотровых методов.

В табл. 3 представлены данные по некоторым из этих признаков.

Таблица 3

Параметры чувствительности, вероятности срабатывания и информационные признаки приборного комплекса СПИ, полученные в ходе испытаний

№ п/п	ВВ	Пороговая чувствительность, г/см³	Вероятность достоверного обнаружения критической массы ВВ, %	Вероятность ложных тревог срабатывания индикации обнаружения ВВ, %	Относительная величина сигнала о возможном обнаружении ВВ, % от пороговой чувствительности	Сигнал, соответствующий степени подозрения на наличие ВВ, %
1	2	3	4	5	6	7
1	С-4	1,0x10 ⁻¹³	98	5	140	95
2	RDX	1,1x10 ⁻¹³	97	4	150	94
3	Гексоген российский	1,0x10 ⁻¹³	98	5	140	95
4	Динамит	1,3x10 ⁻¹³	98	3	140	95
5	Нитроглицерин	1,0x10 ⁻¹³	97	5	150	94
6	Нитратные пороха	1,1x10 ⁻¹³	97	4	150	94
7	Нитроманит	1,0x10 ⁻¹³	98	4	140	95
8	Пластит российский	1,0x10 ⁻¹³	98	3	140	95
9	ТНТ	1,1x10 ⁻¹³	99	5	130	96
10	Тротил банка	1,1x10 ⁻¹³	99	5	130	96

Таблица 2

**Список ВВ, участвующих в испытаниях лабораторного макета
приборного комплекса СПИ**

Шифр образца	ВВ	Концентрация насыщенного пара в воздухе при 20 °С, г/см ³
НЗ	Гексоген российский	10 ⁻¹⁴
П5	Нитроглицерин	10 ⁻⁹
М7	Нитроманит	
Н9	2, 4, 6-тринитротолуол (ТНТ)	3,7х10 ⁻¹¹
Н12	этиленгликольдинитрат (ЭГДН)	2,3х10 ⁻⁷
П21	Эластит (ЭВВ-11)	

разбавителя (в данном случае осушенный лабораторный воздух) и потока целевого компонента, создаваемого с помощью сменных источников микропотоков мембранного типа.

В качестве газа-разбавителя использовался поверочный нулевой газ (воздух) (ПНГ) по ТУ 6-21-5-82 или синтетический воздух ГСО-ПГС О₂/N₂ № 3732-87 1-го разряда по ТУ 6-16-2956-92, ГОСТ 17433-80.

Значение массовой концентрации целевого компонента ПГС на выходе генератора ГДП-102 рассчитывалось по формуле:

$$C = \frac{G_N}{R} \cdot 1000,$$

где C — массовая концентрация целевого компонента в газовой смеси, мг/м³;

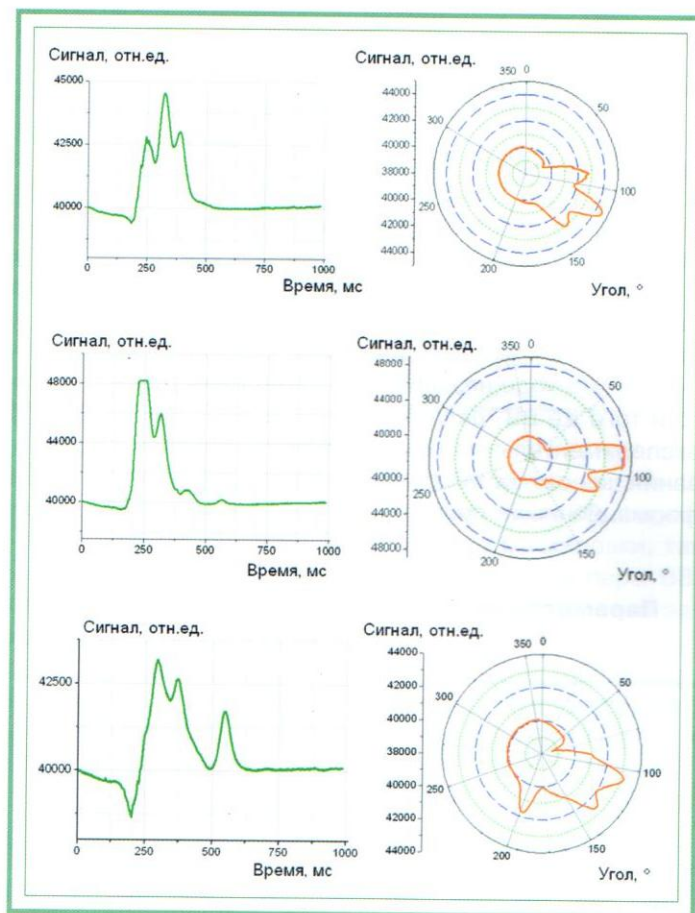
G_N — массовый расход (производительность) источника микропотока при номинальной температуре термостатирования, мкг/мин;

R — расход газа-разбавителя по индикатору, см³/мин.

Список некоторых из ВВ, участвующих в испытаниях лабораторного макета приборного комплекса СПИ, приведён в табл. 2.

**Спектры подвижности ионов паров ВВ
и их круговые диаграммы**

Спектры подвижности ионов паров некоторых ВВ, приведённых в табл. 2, измерены с помощью приборного комплекса СПИ, и рассчитанные на их основе с помощью формул (3)–(4) круговые диаграммы представлены на рис. 3. Как видно, спектры и круговые диаграммы для различных ВВ значительно отличаются друг от друга. Это наиболее отчётливо видно при сопоставлении круговых диаграмм, нанесённых на один чертёж.



**Рис. 3. Спектры подвижности ионов
и соответствующие им круговые
диаграммы ВВ: а — нитроглицерин; б — ЭГДН;
в — эластит**

Для иллюстрации сказанного на рис. 4 показаны круговые диаграммы нитроглицерина, ЭГДН и эластита, совмещённые на одном чертеже.

Измерение спектров подвижности ионов при последовательном продуве тест-образцов с нанесёнными 3 %, 1 %, 0,3 %, 0,1 %, 0,03 % и 0,01 % растворами ВВ в полистироле (см. выше) дало возможность определить пороговую

броса экспериментальных величин нами производились по три независимых измерения для каждого из ВВ, участвующих в испытаниях.

Представление спектров подвижности ионов в форме круговых диаграмм образов

Как уже говорилось выше, распознавание ВВ реализовывалось на базе компараторного блока (см. рис. 1) путём сравнения полученного спектра подвижности ионов со спектрами из банка реперных спектров. Сравнение производилось с использованием специально разработанного программного продукта, сходного с компьютерной программой технологии «Электронный нос» VaporPrint™ фирмы Electronic Sensor Technology. В этой технологии анализируемые данные (хроматограммы) вводятся в программу обработки в виде круговых диаграмм образов.

В настоящей работе получаемые с помощью спектров подвижности ионов данные также преобразовывались в форму круговых диаграмм.

Преобразование осуществлялось следующим образом. Спектр подвижности ионов представляет собой зависимость сигнала (ионный ток), получаемого на коллекторе ионов, расположенном вслед за дрейфовой камерой, от величины смещающего линейно изменяющегося (во времени) напряжения, приложенного к обкладкам дрейфовой камеры. Величина ионного тока I пропорциональна количеству ионов данного типа (данного ВВ), которые достигли коллектора ионов, то есть пропорциональна концентрации паров ВВ данного типа в воздухе. Изменяющееся смещающее напряжение U позволяет сканировать поступление на коллектор ионов различного типа в зависимости от величины их подвижности. Расположение и интенсивность пиков в спектре подвижности ионов содержат информацию о типе и концентрации данного вещества.

Преобразование обычного спектра подвижности ионов в круговую диаграмму состоит в переходе от декартовых координат $\langle I, U \rangle$ к полярным координатам $\langle R, \theta \rangle$ с помощью преобразования:

$$R = I$$

$$\theta = 360^\circ \times (U - U_{\min}) / (U_{\max} - U_{\min}), \quad (3)$$

где $U_{\max}$ и $U_{\min}$ — максимальная и минимальная величины линейно изменяющегося напряжения, соответственно.

Часто вместо величины линейно изменяющегося напряжения используют время, которому

оно пропорционально. Тогда θ рассчитывается по формуле:

$$\theta = 360^\circ \times t / t_{\max}. \quad (4)$$

Вид круговых диаграмм, рассчитанных из исходных спектров, приведён на рисунках ниже.

Подготовка образцов — источников паров ВВ для проведения испытаний лабораторного макета приборного комплекса СПИ

Для проведения сравнительных испытаний были изготовлены специальные тест-образцы, производящие различные концентрации паров ВВ. Схематически тест-образец показан на рис. 2.

Тест-образцы представляют собой металлические пеналы со съёмными крышками с обоеих концов для прокачки воздуха сквозь пенал. Внутри пенала находятся плотно упакованные стеклянные капилляры диаметром около 1 мм, всего около 30 штук. На стенки каждого капилляра с внутренней и внешней стороны нанесён тонкий слой раствора ВВ в полистироле. Концентрация ВВ в твёрдой фазе составляет для разных образцов: 3 %, 1 %, 0,3 %, 0,1 %, 0,03 % и 0,01 %. Такой диапазон концентраций позволяет обеспечить в продуваемом сквозь пенал воздухе давление пара ВВ от близкого к насыщенному до 10–14 г/см³ в образце 0,01 %.

Предварительная калибровка тест-образцов производилась с помощью генератора газов ГДП-102, предназначенного для приготовления поверочных газовых смесей (ПГС) компонентов в воздухе, путём сравнения сигналов СПИ датчика при поступлении в него паровоздушных смесей от генератора газов ГДП-102 и от тест-образцов. При этом концентрация ВВ в воздухе зависела как от концентрации ВВ в полистироле, так и от скорости паровоздушного потока.

Принцип действия генератора газов ГДП-102 основывается на смешении потока газа-

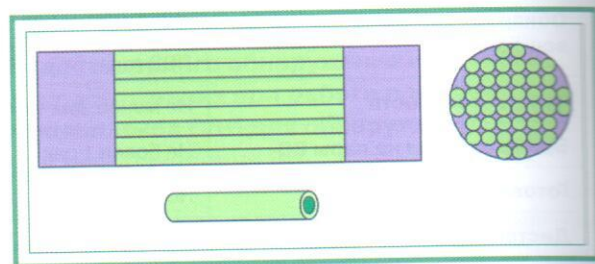


Рис. 2. Тест-образец для генерации паров ВВ необходимой генерации



Ложным называется сигнал тревоги, не вызванный наличием ВВ.

Оценка обнаружения — процесс определения того, является ли сигнал срабатывания истинным или имеет место ложная тревога.

Рассмотрим основные параметры приборного комплекса СПИ, позволяющие судить о качестве обнаружения: вероятность достоверного обнаружения и вероятность ложной тревоги.

Вероятность достоверного обнаружения P_v — вероятность того, что датчик сработает при наличии ВВ. P_v — величина статистическая, оценивается по результатам серии испытаний и, как следствие, зависит от принятой методики испытаний.

Следует отметить, что указание, например, $P_v = 0,9$, само по себе некорректно. Модель обнаружения ВВ описывается двумя параметрами: вероятностью детекции и доверительным интервалом C_L , т. е. датчик будет обнаруживать с вероятностью P_v при уровне C_L . Отметим, что такая полная информация обычно недоступна. В большинстве случаев приходится довольствоваться значением P_v , которое следует считать условным, основанным на предположениях.

Вероятность ложной тревоги P_f — вероятность того, что за время T произойдёт ложное срабатывание датчика. Статистически оценивается частотой ложных тревог — количеством ложных тревог за определённый интервал времени. Средний интервал времени между двумя последовательными ложными срабатываниями называется наработкой на ложное срабатывание (T_f). В представлении о пуассоновском характере потока ложных тревог можно записать:

$$P_f = 1 - \exp(-t_p / T_f),$$

где P_f — вероятность ложной тревоги; t_p — время нахождения датчика в работоспособном состоянии.

Если плотности вероятности случайных функций, описывающих смесь сигнала и помех и только помехи, обозначить через P_x и P_n соответственно, то условная вероятность достоверного обнаружения определяется как:

$$P_v = \int_{x_0}^{\infty} p_x(x) dx. \tag{1}$$

В отсутствие сигнала можно принять ложное решение, оцениваемое условной вероятностью ложной тревоги:

$$P_f = \int_{x_0}^{\infty} p_n(x) dx. \tag{2}$$

Строго говоря, эти вероятности можно определить, проведя испытания приборного комплекса СПИ, например, на реальном транспорте в аэропорту при движении на нём багажа. По определению вероятность достоверного обнаружения — это вероятность того, что датчик сработает при наличии ВВ, а вероятность ложной тревоги — это вероятность того, что за время T произойдет ложное срабатывание датчика. Такая статистическая оценка возможна лишь при проведении полевых испытаний в реальных условиях, причём точность определения указанных величин тем выше, чем большее число багажа участвует в испытаниях и чем большее время они занимают.

В рамках лабораторных испытаний по упрощённой схеме оценка этих величин может быть произведена с помощью формул (1) и (2) при измерении разброса данных экспериментальных спектров СПИ в предположении о стандартном распределении ошибок. С целью оценки раз-

Таблица 1

Технические характеристики газоанализатора паров взрывчатых веществ «КРОН-В»

Аналитический принцип	Нелинейная зависимость подвижности ионов от напряжённости электрического поля
Обнаруживаемые взрывчатые вещества	Тринитротолуол, нитроглицерин, тетранитропентаэритрит (ТЭН), пентаэритриттетранитрат (PENT), триацетонтрипероксид (ТАТП), тетрил, ПВВ (пластиты), RDX (гексоген), HMX (октоген) и ВВ кустарного производства
Чувствительность	Не менее чем 1×10^{-13} г/см ³
Время отклика на пары ВВ	Не более 1 сек
Готовность к работе	Не более 5 сек
Дистанция отбора паров ВВ	10 мм (максимальная – 60 мм)
Сигналы оповещения	Звуковая и графическая информация (в виде ионограмм)
Габаритные размеры	260x270x70 мм

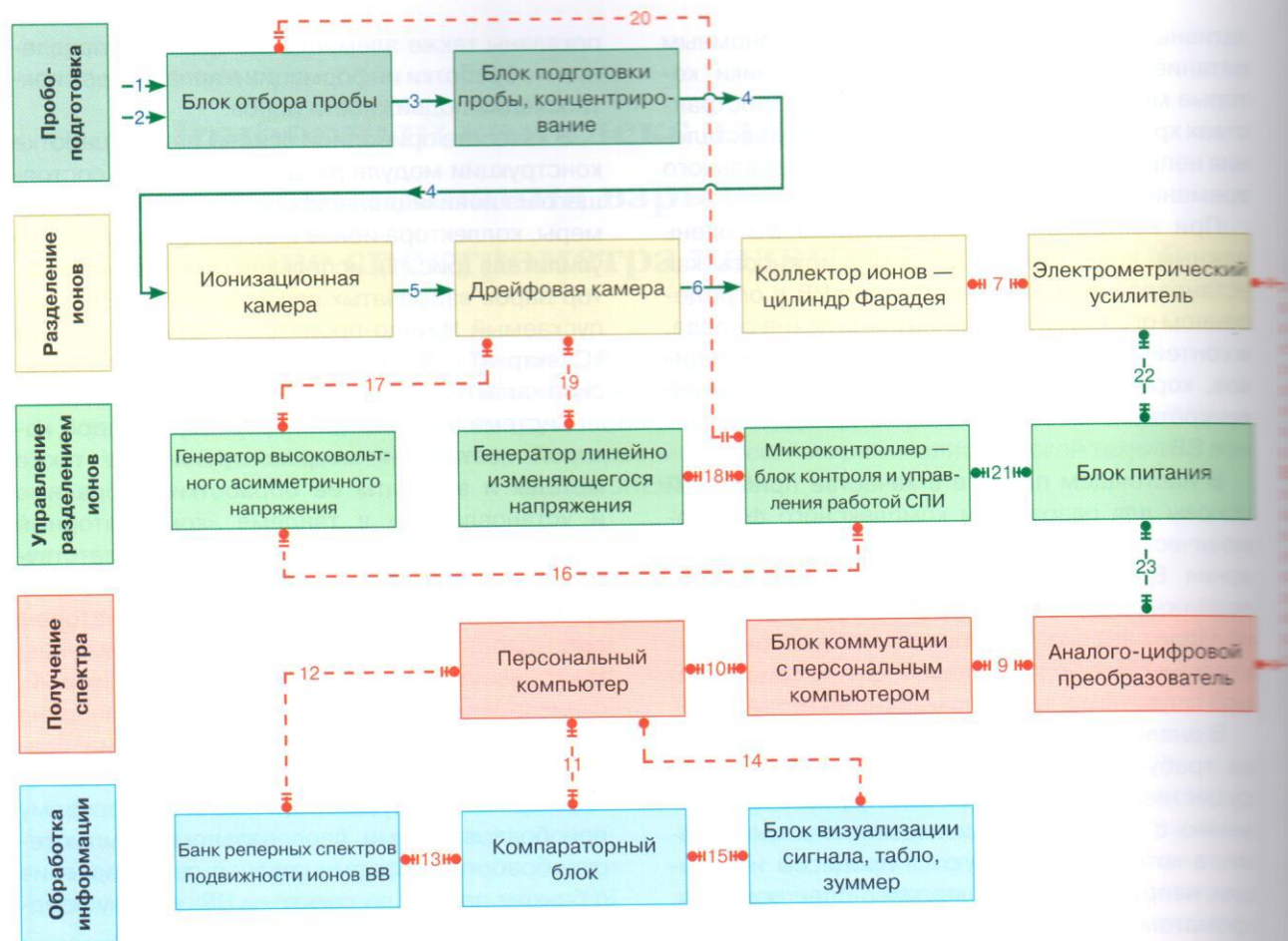


Рис. 1. Блок-схема приборного комплекса СПИ для обнаружения и распознавания ВВ и алгоритмов обработки информации в аппаратуре спектроскопии подвижности ионов

Синие сплошные линии — перемещение потока газа-носителя, содержащего пары ВВ. Красные штриховые линии — электрические соединения между функционирующими блоками системы, передающие управляющие сигналы и сигналы спектра подвижности ионов. Зеленые штриховые линии — силовые электрические соединения, передающие электропитание

14–15 выдаёт команду блоку для визуализации или/и озвучивания сигнала тревоги.

Блок контроля и управления работой СПИ оптимизирует работу генератора высоковольтного асимметричного напряжения (линии 16, 17) и генератора линейно изменяющегося напряжения (линии 18, 19), сигналы от которых, в свою очередь, поступают на дрейфовую камеру. Блок отбора пробы (всасывающий насос) управляется также блоком контроля по линии 20. По линиям 21, 22, 23 поступает электропитание от блока питания на блоки контроля, усилителя и аналого-цифрового преобразователя.

Установленная на персональном компьютере специальная программа при сравнении измеренного спектра со спектрами из библиотеки данных позволяет не только выбрать наиболее близкие между собой спектры, но и оценить вероятности наличия признаков совпадения

и признаков ложного совпадения. Отсюда можно определить (и в ходе лабораторных испытаний макета это было сделано (см. ниже) вероятность достоверного обнаружения критической массы взрывчатого вещества и вероятность ложных тревог срабатывания индикации обнаружения ВВ.

Методика оценки вероятностей достоверного обнаружения и ложного срабатывания при работе приборного комплекса СПИ для обнаружения и распознавания ВВ

Использованы следующие основные термины и определения.

Обнаружение — процесс выявления наличия ВВ в определённом месте, например, в багаже.

тативные переносные устройства с автономным питанием и небольшие по размеру датчики, которые можно размещать в замкнутых пространствах хранения багажа и грузов для осуществления непрерывного контроля в режиме реального времени.

При контроле за перемещением ВВ очень важным аспектом является возможность как установления факта присутствия ВВ в определенном ограниченном пространстве (на складе, в контейнере, в группе предметов багажа, ящиков, коробок), так и способность локализации конкретного места, в котором находится данное ВВ.

В настоящем проекте в качестве приборной основы для разработки комплексного физико-химического метода обнаружения и распознавания ВВ был выбран метод спектроскопии подвижности ионов (СПИ) [1–9]. Этот метод обладает высокой чувствительностью при регистрации газообразных компонентов, сопоставимой с чувствительностью масс-спектрометра.

В анализаторах, основанных на этом методе, не требуется создания высокого вакуума, что существенно упрощает их конструкцию по сравнению с другими аналитическими устройствами, в которых используются процессы ионизации, например, такими, как масс-спектрометры, хроматомасс-спектрометры, электронные спектрометры.

Спектрометры подвижности ионов в базовом исполнении в настоящее время довольно широко распространены. Ими оснащены, в частности, пункты контроля в некоторых аэропортах. Однако у выпускаемых приборов имеется существенный недостаток, связанный со слабой селективностью СПИ метода. Другими словами, с помощью такого анализатора можно установить факт наличия ВВ, но не распознать, какое именно из них обнаружено.

Для решения проблемы распознавания ВВ нами был разработан приборный комплекс, в состав которого, наряду со СПИ-анализатором, входят модули пробоподготовки, управления работой СПИ-анализатора с обратной связью, обработки спектров и анализа полученной информации с применением специальных алгоритмов оценки вероятностей достоверного обнаружения ВВ и ложного срабатывания системы.

Приборный комплекс СПИ для обнаружения и распознавания ВВ

Блок-схема приборного комплекса СПИ, разработанного и изготовленного в виде лабораторного макета, представлена на рис. 1, на котором

показаны также элементы алгоритмов управления и обработки информации в аппаратуре спектроскопии подвижности ионов.

В качестве приборной основы при разработке конструкции модуля разделения ионов, состоящего из ионизационной камеры, дрейфовой камеры, коллектора ионов и электрометрического усилителя (рис. 1), использовался газоанализатор паров взрывчатых веществ «КРОН-ВВ», выпускаемый Научно-производственным центром «Спектр-АТ». В табл. 1 представлены технические характеристики этого прибора.

Система управления информацией, ядро которой составляет микроконтроллер, а также методы и алгоритм её обработки, собранные и установленные в тандеме «компараторный блок — персональный компьютер с соответствующим программным продуктом», обеспечивают следующие функции: управление генератором высоковольтного асимметричного напряжения, контроль уровней напряжений схем питания, формирование сигнала для генератора линейно изменяющегося напряжения, управление всасывающим насосом, обмен информацией с усилителем, передачу данных к аналого-цифровому преобразователю и персональному компьютеру, обработку информации и её сопоставление с банком данных по спектрам ВВ, выдачу предупреждающих сигналов.

Два независимых газовых потока — анализируемого газа 1 и газа-носителя 2 (рис. 1) поступают в блок отбора пробы, а затем, по газотранспортной линии 3, в блок пробоподготовки для концентрирования. Затем анализируемый газ по линии 4 направляется в ионизационную камеру, по линии 5 в дрейфовую камеру, после чего анализируемая фракция разделённого потока ионов по линии 6 направляется в коллектор (цилиндр Фарадея) для регистрации.

Полученный в коллекторе ионов электрический сигнал, пропорциональный концентрации анализируемой фракции ионов, поступает по электрической линии 7 в электрометрический усилитель. Усиленный сигнал по линии 8 поступает в аналого-цифровой преобразователь, а затем по линиям 9 и 10 через блок коммутации в персональный компьютер.

В персональном компьютере, соединённом через линию 11 с компараторным блоком, производится сравнение полученного спектра со спектрами из банка реперных спектров подвижности ионов ВВ, соединённого с компьютером и компараторным блоком линиями 12 и 13 соответственно, с целью их идентификации. В случае совпадения спектров тандем «персональный компьютер — компараторный блок» по линиям

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
11	Тротил концентратор	$1,1 \times 10^{-13}$	99	5	130	96
12	ЭГДН	$1,2 \times 10^{-13}$	98	3	100	95
13	ЭДНА	$1,3 \times 10^{-13}$	98	4	100	95
14	Артиллерийский порох	$1,1 \times 10^{-13}$	97	4	140	95
15	ТАТП	$1,0 \times 10^{-13}$	98	4	140	94
16	2,4-динитротолуол	$1,0 \times 10^{-13}$	98	3	150	95
17	Октоген	$1,1 \times 10^{-13}$	99	5	150	95
18	Тетрил	$1,1 \times 10^{-13}$	99	5	140	94
19	РЕТН	$1,1 \times 10^{-13}$	99	5	140	94
20	Динитронафталин	$1,2 \times 10^{-13}$	98	3	130	95
21	Эластин (ЭВВ-11)	$1,3 \times 10^{-13}$	98	4	130	95
22	Тринитробензол	$1,1 \times 10^{-13}$	99	4	150	96
23	Аммиачная селитра	$1,1 \times 10^{-13}$	99	3	150	96
24	Порох (сокол)	$1,2 \times 10^{-13}$	99	5	140	95
25	Порох винтовочный	$1,3 \times 10^{-13}$	98	5	140	94
26	Пикриновая кислота	$1,1 \times 10^{-13}$	98	5	130	94
27	Изопропилнитрат	$1,0 \times 10^{-13}$	97	3	130	95
28	ОКФОЛ	$1,0 \times 10^{-13}$	98	4	130	95

Прежде всего, интерес представляет тот факт, что испытуемый приборный комплекс СПИ демонстрирует возможность формировать относительную величину сигнала на уровне 100 % от пороговой чувствительности прибора о возможном обнаружении ВВ для учёта в общем правиле принятия решения. Кроме того, благодаря высокой вероятности достоверного обнаружения критической массы, существует возможность формирования сигнала, соответствующего 97 % степени подозрения на наличие ВВ.

Очевидно, что оцененные вероятности достоверного обнаружения критической массы взрывчатого вещества ($\geq 97\%$), так же, как вероятности ложных тревог срабатывания индикации

обнаружения ВВ ($\leq 5\%$), приведённые в табл. 3, не зависят от агрегатного состояния ВВ, формы и вида, а также принятых мер маскировки, так как объектом обнаружения являются пары ВВ, концентрация которых в воздушной среде не зависит от этих условий.

Результаты испытаний приборного комплекса СПИ показывают, что оснащение спектрометра подвижности ионов системой управления его работой и модулем обработки спектров, снабжённых программой оценки вероятностей достоверного обнаружения ВВ и ложного срабатывания системы, позволяет значительно расширить возможности метода СПИ по обнаружению и распознаванию ВВ.

Литература

1. Collins D. C., Lee M. L. // *Anal. Bioanal. Chem.*, 2002, V. 372. – P. 66.
2. Eiceman G. A. // *Trends in Anal. Chem.*, 2002, V. 21. – P. 259.
3. Borsdorf H., Eiceman G. A. // *Appl. Spect. Rev.*, 2006, V. 41. – P. 323.
4. Asbury G. R., Wu C., Siems W. F., Hill H. H. // *Anal. Chim. Acta.*, 2000, V. 404. – P. 273.
5. Buryakov I. A., Krylov E. V., Nazarov E. G., Rasulev U. Kh. // *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.*, 1993, V. 128. – P. 143.
6. Nazarov E. G., Eiceman G. A., King A. T. // *Sensors and Actuators. A: Physical.*, 2001, V. 91. – P. 307.
7. Miller R. A., Eiceman G. A., Nazarov E. G., King A. T. // *Sensors and Actuators. B: Chemical.*, 2000, V. 67. – P. 300.
8. Buryakov I. A. // *Talanta*. 2003, V. 61. – P. 369.
9. Wu C., Steiner W. E., Tornatore P. S. et al. // *Talanta*. 2002, V. 57. – P. 123.