
**СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

УДК 543.27.-8+543.07+543.51+543.544.33

© А. Н. Арсеньев, Д. Н. Алексеев, Г. В. Бельченко, М. А. Гаврик, А. В. Зверева,
А. В. Зинин, Н. В. Краснов, Ш. У. Мьяльдин, А. Г. Монаков, М. З. Мурадымов,
С. Н. Никитина, С. С. Присяч, Т. В. Помозов, С. Б. Туртия, М. И. Явор

АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ГХ-МС НА БАЗЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ИСТОЧНИКОМ ИОНОВ "ЭЛЕКТРОННЫЙ УДАР"

В рамках Федеральной целевой программы "Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2013 гг.)" разработан аналитический комплекс: (газовый хроматограф—масс-спектрометр) (ГХ-МС) на базе настольного времяпролетного масс-спектрометра с источником ионов "электронный удар" (ЭУ), предназначенный для обнаружения и идентификации токсических и опасных веществ. Аналитические параметры комплекса — чувствительность, разрешающая способность, скорости записи спектра — находятся на мировом уровне в своем классе приборов. При обработке полученных масс-спектров хроматографических компонентов смеси производится идентификация веществ с использованием общепринятой библиотеки масс-спектров электронного удара Национального института стандартов и технологий, (США) NIST.

Кл. сл.: газовая хроматография, времяпролетный масс-спектрометр, источник ионов с электронным ударом, чувствительность, разрешающая способность, точность определения масс, база данных масс-спектров, масс-спектры электронного удара, Национальный институт стандартов и технологий США

ВВЕДЕНИЕ

Газовая хроматография—масс-спектрометрия (ГХ-МС) — метод качественного и количественного анализа широкого круга соединений, открывающий большие перспективы во многих областях, таких как токсикология, медицина, промышленность. ГХ-МС — комбинация двух мощных аналитических инструментов: газовой хроматографии (ГХ), обеспечивающей высокоэффективное разделение компонентов сложных смесей в газовой фазе, и масс-спектрометрии (МС), позволяющей идентифицировать как известные, так и неизвестные компоненты смеси. История развития этого метода и его применение рассмотрены в целом ряде книг и обзоров, например [1, 2].

Наиболее распространенным вариантом ГХ-МС является анализ с применением метода ионизации электронным ударом (ЭУ) [3]. После проведения анализа спектры, полученные при общепринятых условиях ионизации (с энергией электронного пучка в 70 эВ), сравниваются с библиотечными масс-спектрами, как правило, NIST [4] или Wiley [5].

В основе современных аналитических комплексов ГХ-МС лежат три типа масс-анализаторов: квадрупольные, магнитные и времяпролетные. Наиболее распространенными масс-анализаторами

в комплексах ГХ-МС являются квадрупольные [6], обладающие скоростью сканирования до 10 000–15 000 масс/с в диапазоне сканируемых масс 30–1500 Да, хорошей чувствительностью порядка 2–5 пг (в пересчете сухого вещества на колонку), но имеющие невысокую разрешающую способность $R = M$ (фактически в целочисленных массах), малую точность определения детектируемой массы иона (целочисленная) и дискриминацию по мере увеличения массы ионов. Квадрупольные масс-анализаторы вместе с тем малогабаритны, и для их работы не нужен высокий вакуум, а, следовательно, и минимальны средства вакуумной откачки. Все эти факторы вкупе с невысокой ценой делают их наиболее востребованными приборами для ГХ-МС-анализа.

Магнитные масс-анализаторы [7] имеют высокую разрешающую способность в несколько десятков тысяч; чувствительность, достигающую 1–2 пг (в пересчете сухого вещества на колонку), но достаточно медленную скорость сканирования 0.1 с на декаду масс и обладают малой точностью определения массы в режиме сканирования иона ± 0.1 Да. Кроме того, даже самые малогабаритные магнитные масс-анализаторы имеют неполное исполнение, что обусловлено особенностями магнитной системы, и довольно громоздкую вакуумную систему. Как и в случае квадрупольных ана-

лизаторов, невысокая скорость сканирования seriously ограничивает возможности высокоэффективных систем предварительного разделения — ГХ в режиме "он-лайн".

Наиболее перспективными, в настоящее время, являются времяпролетные масс-спектрометры (ВПМС, TOF), обладающие комбинацией уникальных свойств: разрешающая способность от нескольких тысяч до десятков тысяч [8]; чувствительность 1–2 пг; скорость сканирования до 500 спектров/с во всем массовом диапазоне (типичный массовый диапазон: 20–1000 Да); рекордная массовая точность до 0.1 ppm [9]; настольное исполнение. Развитие методов газовой хроматографии и появление двумерной газовой хроматографии (ГХ-ГХ, GC×GC) с крайне узкими хроматографическими пиками (до 100 мс) делает ВПМС единственным классом совместимых детекторов [10]. Вакуумная система прибора по составу сравнима с магнитными масс-спектрометрами, но более компактна из-за меньших размеров масс-анализатора.

На основании патентных материалов и литературных данных проанализирован современный технический уровень, тенденции развития парогозового хромато-масс-спектрометрического анализа. Общая ситуация в данной области аналитического приборостроения характеризуется созданием малогабаритных, компактных комплексов, обладающих высокой чувствительностью, большой разрешающей способностью, высокой точностью определения масс и большой скоростью сканирования.

РАСЧЕТ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

В основу ВПМС положена схема известного времяпролетного масс-анализатора типа "рефлектор" с однократным отражением ионных пакетов от электростатического зеркала [11] и ортогональным ускорением ионов непрерывного пучка [12, 13]. Особенностью рассматриваемого ВПМС является ионно-оптический интерфейс источника, включающий в себя последовательность фокусирующих линз, промежутков дрейфа, апертур и дефлекторов, с возможностью компенсации механических неточностей изготовления и сборки. Главными функциями интерфейса являются формирование пучка заряженных частиц заданного фазового объема, а также формирование кроссовера ионного пучка с оптимальными для масс-анализатора пространственно-угловыми разбросами в промежутке между выталкивающим и заземленным электродами ортогонального ускорителя с энергией в 30 эВ. В реализованном ВПМС пространственная протяженность ионных пакетов в указан-

ном направлении составляет 30 мм., а ускоряющее напряжение в масс-анализаторе 5 кВ. Для расчета разрешающей способности масс-анализатора определялось временное уширение пакета заряженных частиц с фиксированным значением отношения массы к заряду m/z (без учета уширений, связанных с рассеянием ионов на сеточных электродах и вносимых системой регистрации) в плоскости детектора, которое может быть представлено в виде суммы двух слагаемых

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2,$$

где $\Delta T_1 = m(\Delta v_z)_0 / zE$ — время разворота ионов в ортогональном ускорителе ("turn-around time"), обусловленное наличием разброса начальных скоростей заряженных частиц в направлении ускорения в момент действия выталкивающего импульса (E — напряженность однородного поля ускорителя), а ΔT_2 — абберационное уширение временного сигнала, обусловленное относительным энергетическим разбросом ионов δ в направлении выталкивания на выходе из ортогонального ускорителя. Для уменьшения уширения сигнала, связанного с временем разворота, в ВПМС используется ортогональный ускоритель с высокой напряженностью однородного выталкивающего поля $E = 210$ В/мм, а для компенсации временного искажения сигнала, вызванного энергоразбросом заряженных частиц, — двухкаскадное электростатическое ионное зеркало. Соответствующая настройка ионного зеркала позволяет осуществить в плоскости детектора условие независимости времени пролета от энергии во втором абберационном порядке $(T|\delta) = (T|\delta\delta) = 0$, а реализованное соотношение величин напряженностей полей $E_1/E_2 \approx 2.2$ позволяет поддерживать величину времяпролетной абберации третьего порядка $(T|\delta\delta\delta)\delta^3$ на приемлемо низком уровне и избежать больших искажений распределения потенциала в окрестности сеточных электродов. Таким образом, разрешающая способность ВПМС может быть записана в виде

$$R \approx \frac{T_0}{2(\Delta T_1 + |(T|\delta\delta\delta)\Delta\delta^3|)},$$

где T_0 — время пролета заряженных частиц с номинальной кинетической энергией, т. е. частиц, стартующих из середины зазора между выталкивающим и заземленным электродами ортогонального ускорителя.

На рис. 1 приведены результаты расчетов дисперсионной характеристики масс-анализатора, формы временного сигнала в плоскости детектора и соответствующих значений разрешающей способности на различных уровнях интенсивности сигнала при диаметре непрерывного пучка заряженных частиц в ортогональном ускорителе

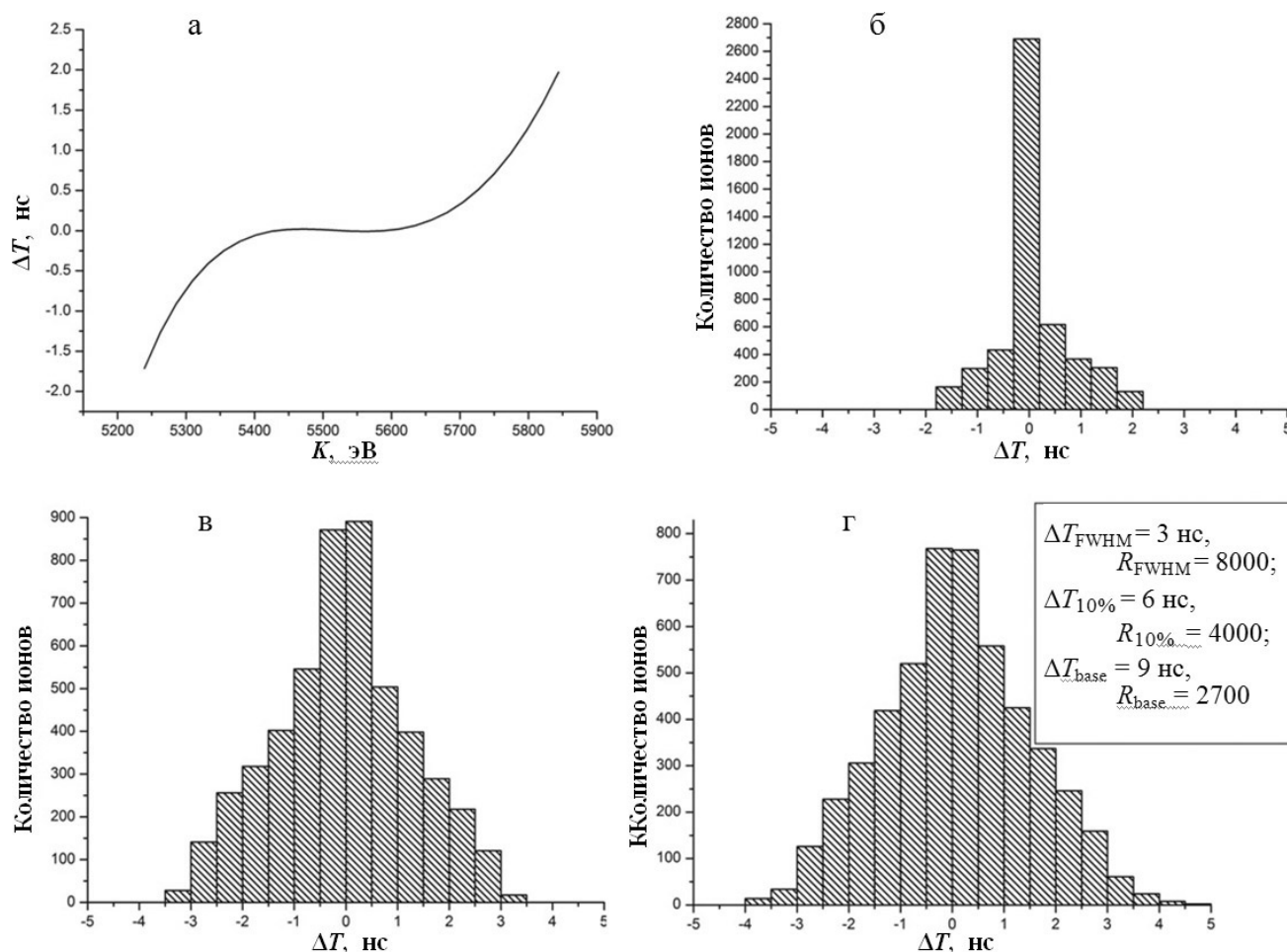


Рис. 1. Дисперсионная характеристика масс-анализатора (а) и временные уширения сигналов (б–г).

б, в — временные уширения, обусловленные энергоразбросом ионов и временем их разворота в ускорителе соответственно; г — временное уширение сигнала в плоскости детектора для ионов $m/z = 1000$ а.е.м. при параметрах: непрерывного пучка ионов в ускорителе $T_0 = 46.9$ мкс, $d = 2.6$ мм, $\Delta\alpha = 3^\circ$, $\Delta K = 550$ эВ. Номинальное значение кинетической энергии ионов в дрейфе составляет $K_0 \approx 5500$ эВ

$d = 2.6$ мм и его угловым разбросе $\Delta\alpha = 3^\circ$, а также временные уширения сигналов, обусловленные энергоразбросом ионов и временем разворота в ускорителе для ионов $m/z = 1000$ а.е.м. Из представленных результатов видно, что разрешающая способность масс-анализатора ограничивается главным образом временем разворота заряженных части в ортогональном ускорителе.

Поскольку рассматриваемый ВПМС с источником ионов с электронным ударом разрабатывался для комплекса ГХ-МС, в котором в качестве газ-носителя широко используется гелий, то в дрейфовом пространстве масс-анализатора размещен импульсный дефлектор, отклоняющий ионы гелия из тракта масс-анализатора и таким образом предотвращающий чрезмерную загрузку детектора.

КОНСТРУКЦИЯ И СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

По результатам расчетов ионно-оптической схемы ВПМС с источником ионов ЭУ была разработана конструкция прибора, в которую также вошли: прогреваемый интерфейс ГХ, через который проходит хроматографическая колонка из термостата ГХ непосредственно в источник ионов с электронным ударом, и отсекающий клапан, который при проведении регламентных и ремонтных работ вакуумноплотно изолирует высоковакуумную часть МС (анализатор и детектор) от источника ионов и ионно-оптического интерфейса источника ионов. Трехмерная модель разработанного ВПМС МХ5313 с основными элементами

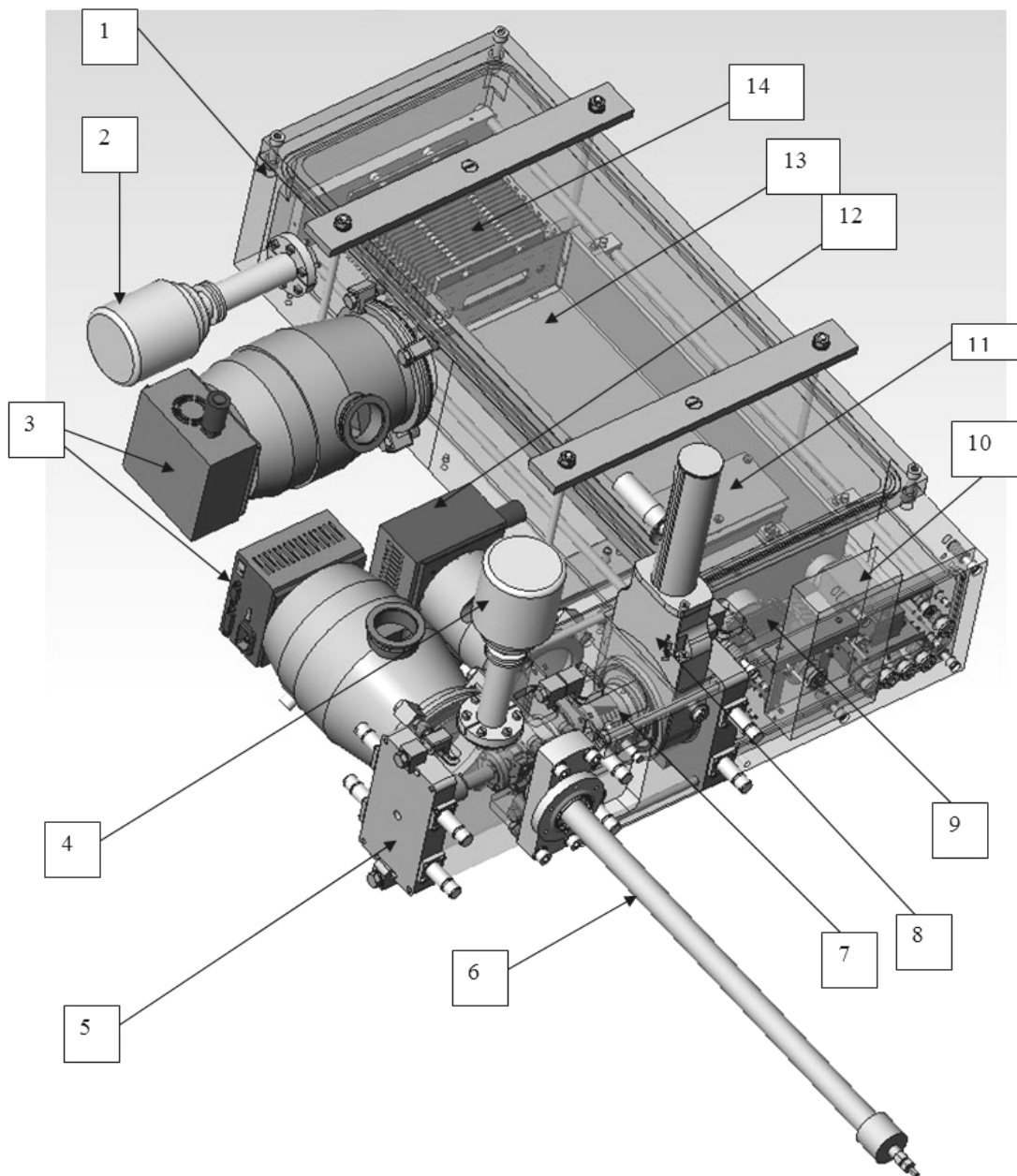


Рис. 2. Трехмерная модель времяпролетного масс-спектрометра MX5313.

1 — высоковакуумная камера масс-анализатора; 2, 4 — датчики контроля высокого вакуума AIM-X-DN; 3 — высоковакуумные турбомолекулярные насосы TURBO V301 Varian с контроллером; 5 — источник ионов ЭУ с двумя катодами; 6 — интерфейс ГХ; 7 — ионно-оптический интерфейс источника ионов; 8 — отсекающий клапан; 9 — импульсный ортогональный ускоритель; 10 — детектор (ВЭУ); 11 — импульсный дефлектор для отклонения ионов гелия; 12 — высоковакуумный турбомолекулярный насос TURBO-81 Varian с контроллером; 13 — дрейфовое пространство; 14 — ионное зеркало

представлена на рис. 2. Оптические элементы масс-анализатора размещены в вакуумной камере размером 260 на 710 мм, что является компромиссным решением между относительно небольшими габаритами времяпролетного прибора

и умеренным уровнем достигаемой разрешающей способности.

Расположение импульсного дефлектора позволяет эффективно отделять ионы газа-носителя гелия из ионного пакета, приходящего на детек-

тор, при этом практически не дискриминируя остальные ионы и не "перегружая" детектор ионным током.

Использование отсекающего клапана позволяет многократно сократить время выхода прибора на рабочий режим, т. к. в процессе технологического обслуживания источника ионов при закрытом клапане и снятом источнике ионов камера масс-анализатора остается под высоким вакуумом — $5 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Ионное зеркало выполнено из набора электродов в виде рамок, запитанных через резистивный делитель. В наборе рамок расположены электроды с сетками из проволоки диаметром 50 мкм с шагом 0.5 мм. Электроды — рамки и сетки — выполнены из немагнитной нержавеющей стали. В качестве детектора используется вторичный электронный умножитель ЕТР 14882 (SGE, Australia) с темновым током порядка 6 импульсов в минуту и длительностью регистрируемых импульсов от одиночных ионов порядка 2.1 нс.

Для обеспечения питания МС разработана и изготовлена схема электропитания, включающая в себя покупные электронные блоки и оригинальные, разработанные для этого прибора. Общее электропитание ВПМС осуществляется от блока силового питания Vega (TDK-Lambda Americas, США), вырабатывающего напряжения питания ± 24 В, 15 А. Для обеспечения высоковольтного высокостабильного питания использованы блоки питания НР (Applied Kilovolts Ltd, Великобритания) положительной и отрицательной полярностей, у которых при напряжении 2500 В шумовая дорожка составляет 40 мВ.

Комплект специальных разработанных блоков электроники включает в себя:

- 1) блок питания источника ионов с электронным ударом, обеспечивающий ток эмиссии электронов в пределах от 5 мкА до 5 мА с точностью не хуже 0.5 % со стабилизацией по току эмиссии и программным управлением;

- 2) высоковольтный импульсный генератор с амплитудой напряжения до 1000 В, длительностью импульсов 3–5 мкс и шириной передних и задних фронтов менее 20 нс;

- 3) предварительный широкополосный усилитель с полосой частот 400 МГц и тремя выходами с коэффициентами усиления 1, 10, 100;

- 4) блок контроля высокого вакуума с графическим индикатором, выполняющий функцию управления и контроля четырех вакуумных насосов и трех вакуумных датчиков различных типов для поддержания требуемых уровней давления в различных частях прибора; в блоке имеется возможность включения каждого насоса в определенный момент времени и отслеживания превышения величины заранее установленных порогов для

реализации различных алгоритмов защиты прибора при возникновении внештатных ситуаций, например при потере сетевого напряжения.

Нагрев интерфейса ГХ-МС и ионизационной камеры источника ионов осуществляется терморегуляторами управления и контроля температуры, имеющих два универсальных выхода для подключения датчиков температуры. Рабочая температура интерфейса и камеры — до 250 °С, точность измерений — 0.4 °С, время опроса одного входа — 0.8 с, коммутация нагрузки осуществляется с помощью электромагнитного реле.

Система регистрации ВПМС основана на применении высокоскоростной платы регистрации сигнала U1084A-002 (Agilent, США) и широкополосного предусилителя. Максимальная частота сэмпирования составляет 4 гигаэмпл/с в секунду и обеспечивает следующие характеристики системы регистрации:

- скорость сканирования до 500 спектров в секунду при диапазоне сканирования по массам 20–1000 а.е.м.;

- скорость сканирования до 200 спектров в секунду при диапазоне сканирования по массам 20–5000 а.е.м.

Программное обеспечение (ПО) опытного образца аналитического комплекса ГХ-МС обеспечивает управление и контроль за работой устройств аналитической и электронной частей приборного комплекса, проводит регистрацию масс-спектров, поиск по названиям и химическим формулам веществ, хранящихся в базе данных NIST, просмотр масс-спектров веществ, поиск по запросу веществ, масс-спектры которых соответствуют зарегистрированным комплексом ГХ-МС в базе данных NIST.

Управление работой масс-спектрометра осуществляется комплексом ПО в составе: TOF Acquisor, TOF-control и Bus Builder. Программы эксплуатируются совместно, но имеют различное назначение.

Bus Builder — используется для настройки функциональных единиц прибора.

TOF Control — предназначена для управления и контроля низковольтных и высоковольтных источников питания, состояния вакуумной системы, а также реализует процедуру настройки прибора.

TOF Acquisor — осуществляет контроль регистрации сигнала, представление на экране монитора регистрируемых масс-спектров, запись масс-спектров на внешние устройства памяти, управление масс-спектрометром (совместно с TOF Control).

В программную среду для просмотра и обработки зарегистрированных масс-спектров интегрирована библиотека целочисленной базы масс-спектров электронного удара NIST,

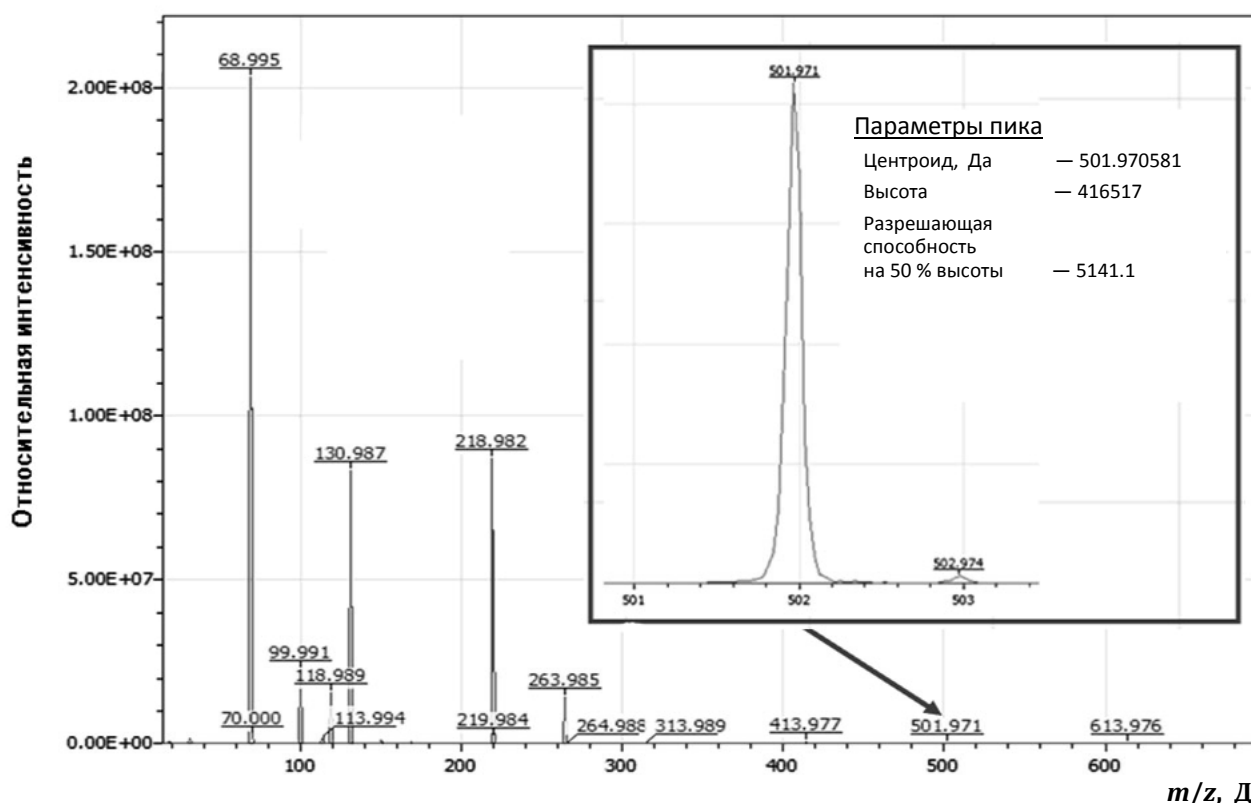


Рис. 3. Спектр выделенной массы 501.97 Да фрагмента масс-спектра тестового вещества PFTBA с разрешающей способностью 5141 на высоте ионного пика 50 %

Теоретические и экспериментально полученные массы ионов спектра PFTBA

№	Тип соединения	Формула	Нейтральная масса, Да	Теоретическая масса, Да	Наблюдаемая масса, да	Ошибка, мДа	Ошибка, ppm
1	PFTBA 69	CF ₃	68.9952096	68.994661	68.994661	0	0
2	PFTBA 100	C ₂ F ₄	99.9936128	99.9930642	99.993074	0.0098	0.09801
3	PFTBA 114	C ₂ F ₄ N	113.996687	113.996138	113.996069	0.069	0.60528
4	PFTBA 119	C ₂ F ₅	118.992016	118.991467	118.991974	0.507	4.26081
5	PFTBA 131	C ₃ F ₅	130.992016	130.991467	130.991944	0.477	3.64146
6	PFTBA 169	C ₃ F ₇	168.988822	168.988274	168.988923	0.649	3.8405
8	PFTBA 219	C ₄ F ₉	218.985629	218.98508	218.985257	0.177	0.80827
9	PFTBA 264	C ₅ F ₁₀ N	263.987106	263.986557	263.986068	0.489	1.85237
10	PFTBA 414	C ₈ F ₁₆ N	413.977525	413.976977	413.976126	0.851	2.05567
11	PFTBA 464	C ₉ F ₁₈ N	463.974332	463.973783	463.974128	0.345	0.74358
12	PFTBA 502	C ₉ F ₂₀ N	501.971138	501.970589	501.970589	0	0
13	PFTBA 614	C ₁₂ F ₂₄ N	613.964751	613.964202	—	—	—

обеспечивающая поиск, просмотр структурных формул и формирование поисковых запросов веществ, хранящихся в базе данных NIST.

Комплекс ГХ-ВПМС испытывался в комплекте с газовым хроматографом "КРИСТАЛЛ 5000" с капиллярной колонкой HP-5MS (Agilent Technologies, 30 м × 0.250 мм × 0.25 мкм) с максимальной рабочей температурой 325 °С.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА ГХ-ВПМС

Разрешающая способность приборного комплекса показана на примере тестового вещества перфтортрибутиламина (PFTBA) для иона массой 501,97Да (рис. 3). Расчет разрешающей способности происходит автоматически по формуле: $R =$

$= t / 2\Delta t$, где R — разрешающая способность, t — временное положение пика (время пролета ионов данной массы), Δt — временная ширина пика на полувысоте (50 % интенсивности пика).

Точность определения массы анализируемых ионов продемонстрирована на примере масс-спектра фрагментов вещества РГТВА — сравнение экспериментальных и теоретических значений масс ионов, представленных в таблице. Из таблицы следует, что ошибка определения масс ионов приборным комплексом не превышает 1 мДа во всем регистрируемом массовом диапазоне.

Экспериментальное определение чувствительности комплекса ГХ-ВПМС проводилось с использованием стандарта — раствора гексахлорбензола (НСВ, Agilent #8500-5808). Использовались следующие параметры при проведении эксперимента: температура источника ионов 250 °С, ток эмиссии 2.6–3.0 мА, температура интерфейса 250 °С, поток гелия из газового хроматографа — 1 мл/мин. Режим работы термостата хроматографа "КРИСТАЛЛ 5000": стартовая температура 100 °С;

пауза 30 с; скорость нарастания температуры 20 °С/мин с выходом на 215 °С. На время выхода растворителя из колонки (60 с) выключали ток накала катодов, с помощью автоинжектора вводили 1 мкл стандарта НСВ с коэффициентом деления потока 1:50, соответствующий 2 пг сухого вещества, введенного в колонку. Одновременно с инъекцией в хроматограф включалась запись хроматограммы длительностью 500 с с включением катодов через 60 с после старта записи хроматограммы.

На рис. 4 (вверху) представлен фрагмент хроматограммы разделения тестового раствора НСВ, полученный интегрированием площади пика масс-спектра массой 284 Да (Selected Ion Current, SIC), при инъекции в расчете 2 пг сухого вещества на колонку и фрагмент масс-спектра тестового раствора НСВ (внизу), полученный интегрированием хроматографического пика, соответствующего по времени выхода НСВ. Из рис. 4 видно, что при этих условиях отношение сигнал/шум ~ 20.

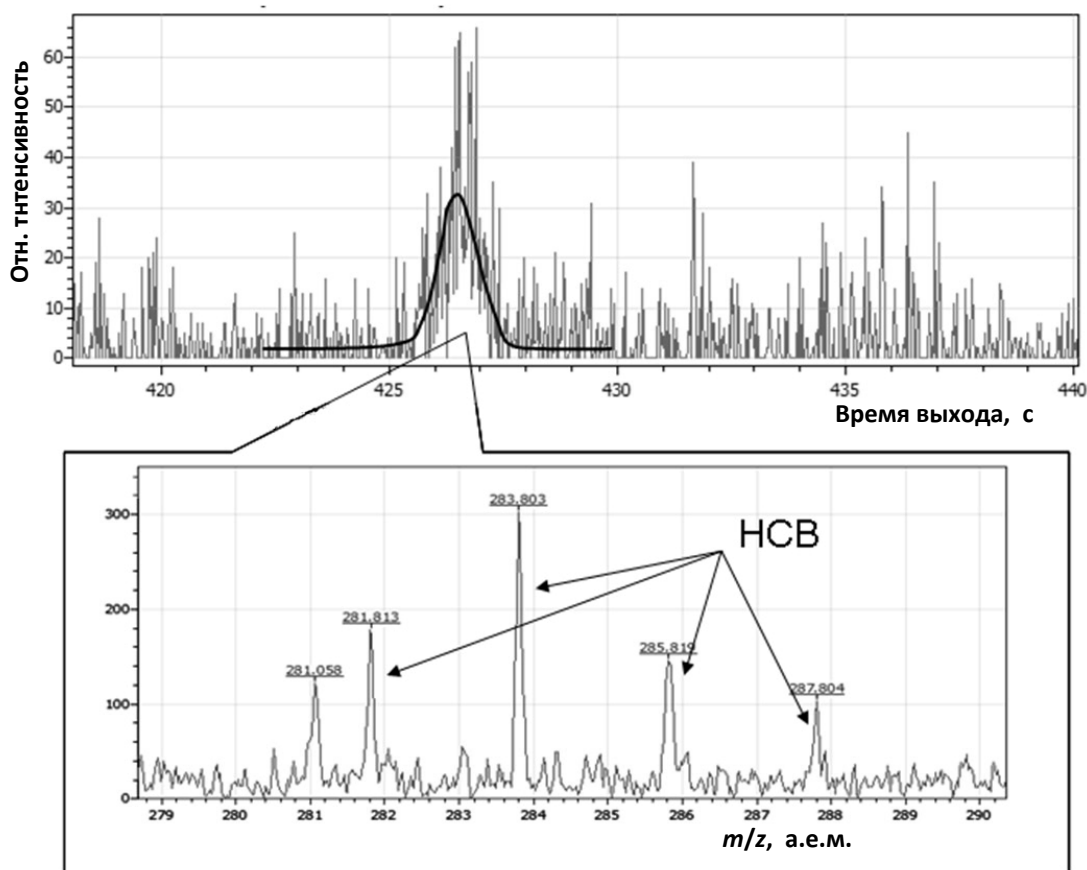


Рис. 4. Фрагмент хроматограммы с пиком НСВ (вверху) и соответствующий ему фрагмент спектра (внизу)

После хроматографического разделения исследуемой смеси и получения масс-спектров компонентов, программное обеспечение приборного комплекса позволяет провести идентификацию полученных масс-спектров, используя внешнюю базу данных NIST. Например, оценка совпадения вещества НСВ в расчете 2 пг сухого вещества на колонку (рис. 4.) по всем параметрам превышает 80 % и является наивысшей оценкой для данного масс-спектра.

ВЫВОДЫ

Основываясь на представленных материалах, можно сделать вывод о том, что разработанный в ИАП РАН аналитический комплекс ГХ-ВПМС MX5311 по своим основным аналитическим параметрам не уступает современным зарубежным аналогам (LECO Pegasus HT TOFMS; JEOL Accu-TOF GCv 4G). Заложенные в разработанный прибор решения позволяют использовать его в тандеме с высокоскоростной газовой хроматографией (Rapid GC), а также с системами двумерной ГХ (GC $\times$ GC). Дальнейшее улучшение приборного комплекса может идти по пути роста разрешающей способности, массовой точности и увеличения номенклатуры источников ионов (химическая ионизация, полевая ионизация, прямой ввод). Фактически рассматриваемый прибор MX5311 является первым российским приборным комплексом ГХ-МС с источником ионов типа ЭУ на основе времяпролетного масс-анализатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sparkman D., Penton Z., Kitson F.* Gas Chromatography and Mass Spectrometry (Second Edition). A practical guide. MA, USA: Elsevier Inc., 2011. 632 p.
2. *Гладилович В.Л., Подольская Г.П.* Возможности применения метода ГХ-МС (обзор) // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 4. С. 36–49.
3. *Nier A.* A mass spectrometer for isotope and gas analysis // Rev. Sci. Instrum. 1947. V. 18. P. 398–412.
4. URL: (<http://www.nist.gov/srd/>).
5. URL: (<http://eu.wiley.com/WileyCDA/Section/id-301546.html>).
6. *Finnigan R.E.* Quadrupole MS: A History // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 969A–975A.
7. *Cottrell J.S., Greathead R.J.* Extending the mass range of a sector mass spectrometer // Mass Spectrom. Rev. 1986. V. 5, issue 3. P. 215–247.
8. *Verentchikov A.N., Yavor M.I., Hasin Y.I., Gavrik M.A.* Multi-reflecting TOF analyzer for high resolution MS and parallel MS-MS // Mass Spectrometry. 2005. V. 2. P. 11–20.
9. *Siek K., Artaev V., Binkley J. et al.* Accurate isotopic fine structure and relative isotope abundance by ultra-high resolution time-of-flight mass spectrometry for confident elemental composition determination // Proc. of 59th ASMS Conference on Mass Spectrometry, 2011, Denver, Colorado, USA.
10. *Kalinova B., Jiros P., Zdarek J. et al.* GC $\times$ GC/TOF MS technique — A new tool in identification of insect pheromones: Analysis of the persimmon bark borer sex pheromone gland // Talanta. 2006. V. 69, issue 3. P. 542–547.
11. *Мамырин Б.А., Каратаев В.И., Шмигк Д.В., Загулин В.А.* Масс-рефлектор. Новый безмагнитный времяпролетный масс-спектрометр с высокой разрешающей способностью // ЖЭТФ. 1973. Т. 64, В. 1. С. 82–89.
12. *Mirgorodskaya O.A., Dodonov A.F., Chernushevich I.V. et al.* Application of time-of-flight mass spectrometer with orthogonal acceleration to analysis of peptides and proteins // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 112–126.
13. *Веренчиков А.Н., Краснов Н.В., Мурадымов М.З., Хасин Ю.И.* Простая качественная модель времяпролетного масс-спектрометра // Научное приборостроение. 2002. Т. 12, № 4. С. 63–69.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург**

Контакты: *Краснов Николай Васильевич,*
krasnov@alpha-ms.com

Материал поступил в редакцию 25.01.2013

GC-MS ANALYTICAL COMPLEX BASED ON TIME-OF-FLIGHT MASS SPECTROMETER WITH AN ELECTRON IMPACT ION SOURCE

A. N. Arseniev, D. N. Alexeev, G. V. Belchenko, M. A. Gavrik, A. V. Zvereva, A. V. Zinin, N. V. Krasnov, Sh. U. Myaldzin, A. G. Monakhov, M. Z. Muradymov, S. N. Nikitina, S. S. Prisyach, T. V. Pomezov, S. B. Turtia, M. I. Yavor

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

As part of the federal framework program "National System of chemical and biological security of the Russian Federation (2009-2013 years)" developed analytical complex: a gas chromatograph - mass spectrometer (GC-MS) based on the desktop time-of-flight mass spectrometer with electron impact ion source (EI) intended for the detection and identification of toxic and hazardous substances. Analytical parameters of the complex - the sensitivity, resolving power, recording rate of the spectrum, are at the world class level of devices. The obtained mass spectra of chromatographic components of a mixture of substances shall be identified using common library of mass spectra of electron impact of the National Institute of Standards and Technology (USA) NIST.

Keywords: gas chromatography, time-of-flight mass-spectrometer, electron impact ion sources (EI), sensitivity, resolution, mass accuracy, data base for mass spectra electron impact, NIST