

Масс-спектрометр высокого разрешения для химического анализа. Бережковский М. А., Галль Р. Н., Вершевский В. Б., Петрова Е. Б., Фридлянский Г. В., Фуксман В. Е. — В кн.: Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента. Л., «Наука», 1982, с. 109—117.

На основе оригинальной конструкции ионно-оптической схемы с коррекцией аберраций, обусловленных горизонтальными и вертикальными параметрами пучка, построен масс-спектрометр для химического анализа с предельной разрешающей способностью 100 000 и погрешностью измерения относительной разности масс $(1-2) \cdot 10^{-6}$. На приборе возможен анализ соединений с различными физико-химическими свойствами, вплоть до наиболее труднолетучих с упругостью пара $10^{-6}-10^{-7}$ мм рт. ст. при 350°C . Система обработки информации, включающая малую ЭВМ, позволяет определять точные значения масс и элементные составы всех пиков масс-спектра, содержащих 100 и более ионов. Лит. — 12 назв., ил. — 3, табл. — 1.

*М. А. Бережковский, Р. Н. Галль, В. Б. Вершевский,
Е. Б. Петрова, Г. В. Фридлянский, Б. Е. Фуксман*

МАСС-СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Масс-спектрометр МХ1310 является прибором высокого разрешения для исследования структуры и свойств сложных органических соединений и позволяет широко использовать те преимущества масс-спектрального метода, которые ставят его вне конкуренции в ряду современных аналитических методов, а именно: многообразие и уникальность информации при относительной простоте интерпретации, быстрота анализа, малое количество пробы, возможности сочетания с другими методами, гибкость и глубина регулирования условий эксперимента. С его помощью может проводиться определение элементного состава и изучение структуры органических веществ с молекулярным весом до 1500—2000 а. е. м., определение физико-химических констант (потенциалы ионизации молекул, потенциалы появления осколочных ионов, термодинамические характеристики и другие параметры). Масс-спектрометр может использоваться и как инструмент для идентификации синтезированных или выделенных каким-либо способом, например при хроматографическом анализе, соединений, для качественного и количественного анализа смесей, а также для многих других аналитических работ, в которых определяются элементный состав, относительное содержание и характеристики веществ.

Широкие аналитические возможности обусловлены следующими отличительными особенностями прибора, характерными для современных химических масс-спектрометров высокого класса:

а) высокая разрешающая способность при достаточно высокой чувствительности;

б) точное определение масс ионов ручным и автоматическим способом, последнее — в широком диапазоне масс (при наличии системы обработки);

в) автоматическая регистрация спектра масс при широком выборе условий регистрации;

г) регулирование режимов работы масс-анализатора с целью выбора оптимальных для данной задачи чувствительности и разрешающей способности;

д) наличие нескольких одновременно подключаемых систем ввода, в том числе газожидкостного хроматографа, что позволяет анализировать соединения с различными физико-химическими свойствами;

е) регулирование в широких пределах режимов работы ионного источника — энергии электронов, электронного тока, температур испарения пробы и ионизационной камеры;

ж) возможность регистрации полного ионного тока и метастабильных ионов;

з) возможность использования нетрадиционных методов ионизации — ионизации в сильном электрическом поле и химической ионизации.

В качестве прибора первого класса масс-спектрометр входит в унифицированный комплекс масс-спектрометрических приборов и построен по блочному принципу, вследствие чего комплект его поставки является переменным и может быть определен исходя из конкретных задач и потребностей заказчика. Предусматривается постепенное оснащение прибора вновь разрабатываемыми узлами и устройствами.

Общий вид масс-спектрометра показан на рис. 1. Прибор, не считая системы обработки информации, состоит из пяти стоек. В аналитической стойке, кроме ионно-оптической и вакуумной систем, размещены две

системы ввода пробы (прямого ввода и капиллярная) и некоторые электронные блоки, включая канал питания электромагнита. Другие электронные блоки и каналы, обеспечивающие питание масс-анализатора и источника ионов, а также каналы точного измерения относительной разности масс и индикации массовых чисел сосредоточены в стойке управления и контроля. Широкополосный усилитель электронного умножителя и светолучевой осциллограф установлены в стойке регистрации. В стойке напуска смонтированы системы ввода для легколетучих и тяжелых органических соединений. Мощные силовые элементы (реле, пускатели, силовые трансформаторы), представляющие собой источник помех для масс-анализатора, собраны в стойке силового питания, которая располагается в максимально возможном удалении от аналитической стойки.

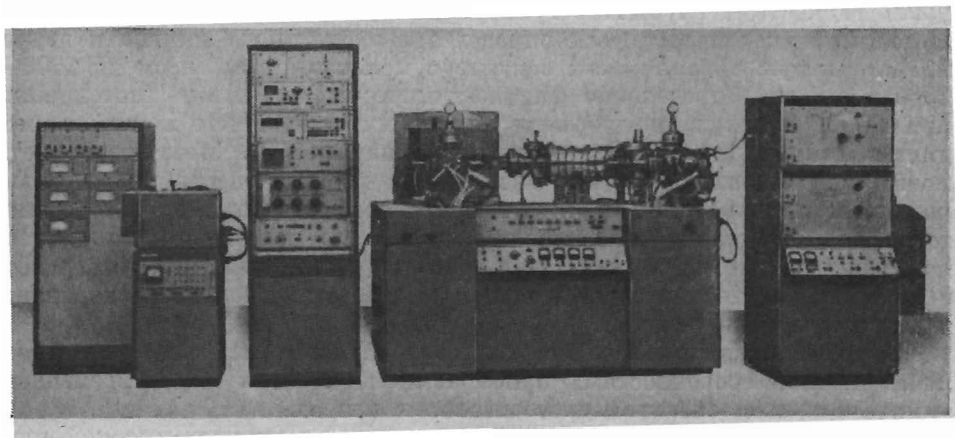


Рис. 1. Общий вид масс-спектрометра.

Масс-спектрометр построен по оригинальной ионно-оптической схеме (рис. 2), разработанной в НТО АН СССР. Эта схема наряду с коррекцией наиболее весомых горизонтальных aberrаций, т. е. aberrаций, обусловленных углом горизонтальной расходимости пучка и разбросом ионов по энергиям, обеспечивает коррекцию «вертикальных aberrаций», определяемых углом вертикальной расходимости и высотой пучка и вызывающих искривление и уширение изображения.

Рассмотрим этот вопрос более подробно. Проблема минимизации «вертикальных aberrаций», существенно ограничивающих светосилу масс-анализатора, в настоящее время играет заметную роль в развитии масс-спектрометрической техники, поскольку методы подавления aberrаций других типов, главным образом горизонтальных, предложены уже давно [1] и в последние годы усовершенствованы за счет более точного учета влияния краевых полей [2]. Известен метод коррекции «вертикальных aberrаций» с помощью гексапольных линз [3], примененный в масс-спектрометрах серии MS9 (Англия) и позволяющий не только исправить форму линии, но и сместить и повернуть пучок относительно вертикальной плоскости. Эффект применения таких линз оказался весьма значительным: предельная разрешающая способность возросла с 50 000—60 000 до 150 000, а светосила — примерно на порядок. К недостаткам этого метода можно отнести усложнение конструкции и схемы питания масс-спектрометра. Схема с тороидальным электростатическим конденсатором [4] также позволяет уменьшить вертикальные aberrации, однако ее реализация не обеспечивает полной коррекции и связана с технологическими трудностями. Более радикальным средством является отказ от секторных полей и переход к призмной оптике [5], в которой фокусиру-

ющие и диспергирующие элементы разделены, а в качестве магнитного и электростатического анализаторов используются двумерные поля. В таких системах при определенных условиях форма линии является строго прямолинейной, при этом может осуществляться фокусировка пучка в вертикальной плоскости. Однако призмные системы, реализация которых сопряжена с рядом конструктивных и схемных трудностей, почти не проверялись на практике и использование их в качестве базовой модели представляется пока преждевременным.

В ионно-оптической схеме масс-спектрометра МХ1310 используется метод коррекции «вертикальных aberrаций», основанный на применении магнитного поля с границами специальной формы. Как показано в ра-

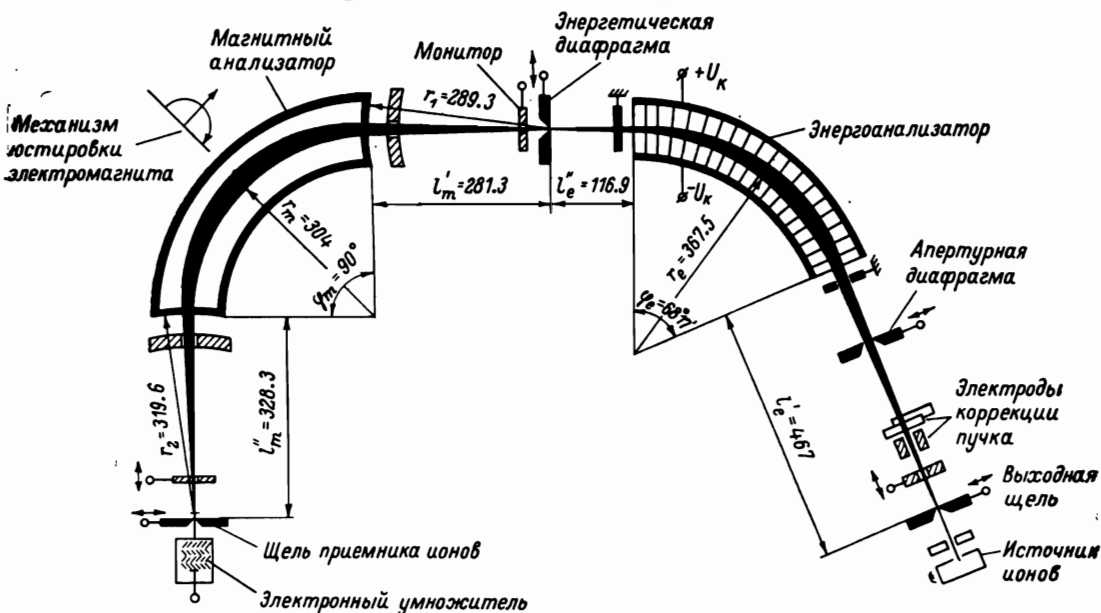


Рис. 2. Ионно-оптическая схема масс-спектрометра.

Дисперсия системы 3.16 мм/1% $\Delta M/M$; поперечное увеличение 0.583; предельная разрешающая способность 100 000 (при $s_{ир} = s_{вст} = 2$ мкм).

боте [6], в системах, содержащих последовательно расположенные поля цилиндрического электростатического конденсатора и секторного электромагнита, при выполнении условий двойной фокусировки I и II порядка одновременно могут быть скомпенсированы вертикальные aberrации II порядка, для чего необходимо удовлетворить условиям

$$l'_m \approx r_1, \quad l''_m \approx r_2, \quad (1)$$

где l'_m, l''_m — плечи магнитного анализатора; r_1, r_2 — радиусы кривизны вогнутых границ магнитного анализатора со стороны входа и выхода пучка; т. е. радиусы границ магнитного поля должны быть равны соответствующим плечам магнитного анализатора.

При выборе ионно-оптической схемы в процессе перебора многочисленных вариантов наряду с малостью aberrационных коэффициентов учитывались и некоторые другие критерии, направленные на улучшение конструктивных и технологических свойств масс-спектрометра, в частности: а) близость общего угла отклонения ионов к 180° во избежание излишне открытой и растянутой конфигурации масс-анализатора; б) ограничение сверху радиуса энергоанализатора, обусловленное возможностями механического оборудования при достаточно малом эксцентриситете изделия; в) благоприятное отношение дисперсии к поперечному увеличению, повышающее разрешающую способность при данной

ширине щелей источника и приемника; г) наличие протяженного входного плеча энергоанализатора для размещения между источником и масс-анализатором вакуумного затвора, апертурной диафрагмы и некоторых других конструктивных элементов.

Форма спада краевого магнитного поля, использованная в расчетах, была определена экспериментально на макете при условиях $2b=2k=d$, где b — полузазор экрана, k — полузазор магнита, d — расстояние между экраном и краем магнита. Это распределение оказалось весьма близким к кривой, рассчитанной по формулам Герцога [7] для толстого экрана из идеально проводящего железа ($\mu=\infty$). Краевое поле энергоанализатора было рассчитано по формулам Герцога для тонкого экрана, приведенным в той же работе. При этом величина зазора и отверстие в экране были выбраны таким образом, чтобы эффективная граница электрического поля совпадала с физической границей энергоанализатора; в этом случае полный угол отклонения ионов в электрическом поле равен секторному углу конденсатора.

Как видно из рис. 2, ионный пучок отклоняется на $68^\circ 17'$ в электрическом поле и на 90° в магнитном при средних радиусах траектории 376.5 и 304 мм соответственно. При дисперсии $1.08 r_m$, т. е. 3.28 мм на 1% изменения массы, поперечное увеличение составляет 0.583. Таким образом, отношение дисперсии к поперечному увеличению близко к $2 r_m$, т. е. почти вдвое выше, чем в анализаторе с симметричными плечами. Предельное расчетное разрешение при ширине щелей источника и приемника 2 мкм $\sim 100\ 000$. Наиболее значимые абберационные коэффициенты системы равны нулю или настолько малы, что практически не влияют на ширину изображения.

Отметим еще одну особенность системы. Как показано в работе [8], при угле отклонения в магнитном поле 90° линии фокусов по углам и по энергиям в области близ точки двойной фокусировки совпадают, тем самым расширяется зона устойчивой работы ионно-оптической системы, уменьшается или отпадает необходимость в повторных юстировках.

Требуемая конфигурация границ магнитного поля сформирована с помощью выпуклых магнитных экранов, примыкающих к вогнутым краям полюсных наконечников. Максимальная напряженность магнитного поля 11 500—12 000 Э, что позволяет регистрировать при основном ускоряющем напряжении 5 кВ ионы с массой 1300—1400 а. е. м.

Параметры ионного пучка могут регулироваться с помощью апертурной диафрагмы и устройств, регулирующих высоту щелей источника и приемника. В промежуточном фокусе системы установлены энергетическая диафрагма с монитором, используемым для регистрации полного ионного тока и метастабильных ионов.

Юстировка ионно-оптической системы производится механизмами перемещения электромагнита и приемника ионов, энергоанализатор и источник ионов закреплены жестко, правильность их взаимного расположения достигается за счет точного изготовления промежуточных узлов.

Все узлы ионно-оптической системы смонтированы на массивной литой плите, имеющей хорошо обработанную и точно размеченную поверхность; этим гарантируется их установка в расчетное положение как на плоскости, так и по высоте. Плита с ионно-оптической и вакуумной системами лежит на сварном каркасе, опираясь на него через толстую резиновую прокладку по всему периметру. Трубопроводы, ведущие к системам водяного охлаждения и фор-откачки, выполнены гибкими. Благодаря такой конструкции масс-анализатора прибор обладает хорошей виброустойчивостью и может эксплуатироваться в обычных помещениях без специального фундамента. Судя по форме пиков амплитуда механических вибраций не превышает нескольких десятых микрометра.

Ионизация пробы производится электронным ударом. Источник ионов — простой конструкции, легко поддается разборке и чистке. Цоколь источника механически развязан от системы электродов, благодаря этому имеет место хорошая воспроизводимость установки источника относительно жестко закрепленной выходной щели. Электронный ток источника стабилизируется по току коллектора, т. е. по току, проходящему через ионизационную камеру. Максимальный ток коллектора 300 мкА, энергия электронов плавно регулируется в диапазоне 5—100 эВ, а температура ионизационной камеры — от 100 до 400° С. За выходной щелью источника установлены две пары электродов для корректировки направления пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Прецизионные щели источника и приемника ионов выполнены по схеме пружинного параллелограмма [9]. Эта конструкция не содержит трущихся в вакууме деталей и допускает регулировку ширины щелей с погрешностью не более 0.5—1 мкм, что является весьма существенным при установке режимов высокого и сверхвысокого (50 000—100 000) разрешения.

Вакуумная система масс-спектрометра изготовлена из нержавеющей стали и может прогреваться до 350° С. При прогреве температура наиболее ответственных узлов стабилизируется электронными блоками. Область источника откачивается парортутным насосом с жидкоазотной ловушкой. Три таких же насоса откачивают масс-анализатор, который может герметически отсекаться от источника вакуумным затвором (например, при смене источника). Вследствие значительного вакуумного сопротивления перепад давления пробы между источником ионов и масс-анализатором составляет около двух порядков, что позволяет доводить давление пробы в источнике до $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Для откачки устройства прямого ввода пробы используется небольшой паромасляный агрегат. Благодаря экономичной конструкции ловушек жидкий азот сохраняется в них не менее 20—24 ч, так что можно ограничиться одной-двумя заливками азота в сутки. Масс-спектрометр снабжен системами вакуумной и гидравлической блокировок.

Системы ввода пробы, приданные масс-спектрометру, обеспечивают в совокупности возможность анализа широкого спектра соединений, резко различающихся по физико-химическим свойствам. Наименее летучие соединения с упругостью пара $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст. при температурах до 350° С анализируются с помощью устройства прямого ввода, содержащего малоинерционную ампулу-испаритель со временем установления стационарной температуры менее 2 мин и с воспроизводимостью установки температуры лучше 1° С [10]. Эта система является наиболее употребительной, поскольку используется как при анализе тяжелых органических веществ, так и при анализах микроколичеств, включая малоустойчивые соединения.

Устойчивые органические соединения с упругостью пара 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. при температурах до 300° С анализируются с помощью системы ввода тяжелых органических соединений, особенностью которой является эмалированный баллон напуска. Отсутствие контакта с металлом существенно снижает эффекты каталитического разложения пробы на стенках. Легколетучие соединения вводятся через систему с металлическим баллоном напуска, прогреваемую до 150—200° С. Обе системы с баллонами заключены в термостаты, их температура контролируется и стабилизируется с погрешностью $\pm 2^\circ$ С.

Для ввода реперных соединений, например перфторкеросина, предусмотрена капиллярная система, в которой вещество, находящееся под атмосферным давлением, всасывается через подогреваемый микрокапилляр. Возможно также подсоединение масс-спектрометра к газожидкостному хроматографу.

Электронные каналы питания масс-спектрометра характеризуются долговременной (в течение 5—10 мин) нестабильностью $(3-5) \cdot 10^{-6}$ при уровне флуктуаций не выше $1 \cdot 10^{-6}$ и рассчитаны на достижение предельной разрешающей способности 80 000—100 000. Канал питания электромагнита позволяет регулировать ток в пределах 0.5—30 А при относительной нестабильности тока $(1-3) \cdot 10^{-6}$. Развертка магнитного поля по массам может производиться по экспоненциальному и линейному законам в интервале скоростей от 5 до 2000 с на декаду масс.

Канал измерения относительной разности масс содержит в качестве эталонного делителя напряжений магазин сопротивлений высокого класса. При измерении относительной разности масс методом визуального совмещения пиков на экране осциллографа достигается следующая погрешность: для $1\% \leq \Delta M/M \leq 10\%$ — $(1-2) \cdot 10^{-6}$, для $\Delta M/M \leq 1\%$ — $1 \cdot 10^{-6}$.

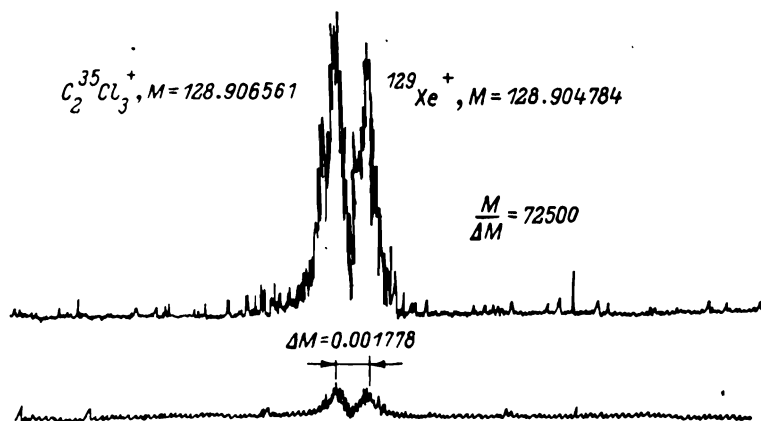


Рис. 3. Дублет высокого разрешения.

Измеритель массовых чисел работает с термостатированным датчиком Холла и имеет погрешность не более ± 0.4 а. е. м. в диапазоне до 1000 а. е. м. Массовые числа выводятся на цифровое табло, поступают в коде на систему обработки и в виде меток регистрируются на ленте светолучевого осциллографа. Темп выведения информации достаточен для регистрации масс-спектра со скоростью 5 с на декаду масс. Основной метод регистрации ионных токов — с помощью электронного умножителя с максимальным коэффициентом усиления $1 \cdot 10^6$. Минимальная постоянная времени этого канала 10^{-4} с. Кроме того, имеется электрометр со входными сопротивлениями 10^{10} — 10^{12} Ом, который используется для градуировки умножителя и других абсолютных измерений. Аналогичный электрометр устанавливается на мониторе энергетической диафрагмы или на заслонке-коллекторе источника ионов; это дает возможность регистрировать полный (не разделенный по массам) ионный ток, а также снимать энергетические спектры метастабильных ионов. В последнем случае ускоряющее напряжение регулируется при постоянном напряжении энергоанализатора. Максимумы ионного тока, наблюдаемые при этом на мониторе, соответствуют различным метастабильным ионам, образовавшимся при распаде материнского иона в промежутке между источником ионов и энергоанализатором; массовые числа дочерних ионов определяются затем при развертке по магнитному полю при фиксированном значении ускоряющего напряжения, отвечающем одному из пиков тока монитора. Масса материнского иона вычисляется как произведение массы дочернего иона на отношение ускоряющих напряжений, соответствующих появлению на мониторе метастабильного пика и общего ионного тока.

При юстировке и наладке масс-спектрометра была получена предельная разрешающая способность $R_{\max} = 80\,000 - 100\,000$ на уровне 10% высоты пиков (рис. 3), что близко к расчетному значению. Координаты приемника и электромагнита, найденные в процессе юстировки, оказались весьма близкими к расчетным значениям — расхождение не превышало 1—1.5 мм. При $R = 40\,000$ параметры пучка были следующие: $s_{\text{ист}} = s_{\text{пр}} = 5$ мкм, $h_{\text{ист}} = 3$ мм, $h_{\text{пр}} = 1$ мм, $2\alpha_1 = \frac{1}{150}$, где $s_{\text{ист}}$, $s_{\text{пр}}$, $h_{\text{ист}}$, $h_{\text{пр}}$ — ширины и высоты щелей источника и приемника соответственно, $2\alpha_1$ — полный угол горизонтальной расходимости. С увеличением разрешающей способности R светосила падает быстрее, чем $1/R^2$; по-видимому, это вызвано отклонениями электрического и магнитного полей от расчетного распределения, вынуждающими уменьшать высоту и апертурный угол пучка. Разрешающая способность 40 000 сохраняется в широком диапазоне изменений магнитного поля, по крайней мере до 10 000 Э (10000 а. е. м.).

В режиме средней разрешающей способности ($R = 2000$), когда высота и апертурный угол пучка ничем не ограничены, через масс-анализатор проходит $\sim 6 - 8\%$ ионов, вышедших из щели источника. Светосила в этом режиме обусловлена только вертикальной расходимостью пучка и равна 10^{-5} А/мм рт. ст. по аргону. Предел чувствительности, определяемый по интенсивности пика ^{38}Ag в атмосферном воздухе, составляет: при $R = 2000 - 10^{-6}\%$, при $R = 10\,000 - 10^{-5}\%$.

При прямом вводе пробы и разрешении $R = 10000$ получена чувствительность по холестерину $5 \cdot 10^{-11}$ Кл/мкг, что не хуже соответствующего параметра зарубежных масс-спектрометров аналогичного класса (например, МАТ-311А фирмы «Varian»), хотя здесь нужно учитывать светосилу источника ионов.

При остаточном давлении в анализаторе $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. и давлении напуска в источнике $(3 - 5) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. интенсивность «хвоста» линии аргона на соседней массе, т. е. при расстройке на 2.5%, составляет 6×10^{-7} от основной линии, при расстройке на 1.5% и 1% — $1.5 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Эти данные характеризуют возможности прибора в отношении анализа малых примесей.

Точность прибора при измерении масс была указана выше.

Следует подчеркнуть, что указанные экспериментальные результаты, полученные на первом образце масс-спектрометра, были воспроизведены на трех последующих экземплярах, не имеющих заметных конструктивных отличий от первого.

Наиболее полноценное использование аналитических возможностей масс-спектрометра возможно лишь при наличии системы автоматизированной обработки информации, с помощью которой как объем, так и качество полезной масс-спектральной информации могут быть существенно увеличены.

Разработанная для масс-спектрометра система обработки информации построена на основе серийно выпускаемых малых ЭВМ М-400 или СМ-3 и снабжена набором программ, позволяющих регистрировать в цифровой форме интенсивности и массовые числа пиков, определять времена их выхода, производить расчет состава смесей. Наряду с этим — и это является главным ее назначением — система рассчитана на обработку масс-спектров высокого разрешения. В этом режиме в реальном масштабе времени регистрируются интенсивность (площадь) пиков, массовое число и время появления центра тяжести пика. Одновременно с анализируемым соединением в масс-спектрометр напускают эталонное вещество — перфторкеросин. Характеристические линии перфторкеросина образуют сетку реперных пиков, точные массы которых предварительно были введены в долговременную память ЭВМ. Во вторичном масштабе времени ЭВМ по временам выхода реперных пиков по методу наименьших

Квадратов составляет полиномы, описывающие зависимость массы (точнее, логарифма массы) от времени, и вычисляет массы пиков анализируемого вещества (метод экстра- и интерполяции) [11, 12]. Такой метод позволяет определить точные значения масс ионов во всем диапазоне развертки, за исключением начального участка (до 100—150 а. е. м.), где точность еще невелика. Если использовать более легкие реперные вещества, например неон, углекислый газ, криптон, то начальный участок можно сдвинуть в область более низких масс. При анализе растительных алкалоидов в Институте химии растительных веществ АН УзССР указанным методом была достигнута погрешность определения массы ионов $(3-4) \cdot 10^{-6}$ в диапазоне от 150 а. е. м. и выше для всех интенсивных пиков, содержащих 100 и более ионов. Образец распечатки с точными значениями масс представлен в таблице. Там же указаны погрешности масс реперных пиков относительно проведенного по ним полинома третьей степени и количество ионов в пике.

Данные автоматической обработки масс-спектра перфторкеросина и лапкоконитина в режиме точного измерения масс ионов

$R = 10\,000$, $t_{\text{дек}} = 128$ с. Спектр нормирован по пику $I_{99} = 10\,000$ (25 000 ионов)

№ пика	M		ΔM	$\Delta M/M$	I/I_{99}				
	табличное	вычисленное							
181	230.98562	230.98564	0.000025	0.00000010	845				
182		231.98819			36				
183		235.98664			61				
184		240.98812			25				
185		242.98555			-0.000063	-0.00000025	378		
186	242.98562	243.98862	-0.000018	-0.00000007	18				
187		247.98653			28				
188		250.98988			14				
189		254.98560			-0.000018	-0.00000007	161		
190		255.64088			-0.000231	-0.00000085	91		
191		255.98781					9		
192		256.14237					40		
193		259.98752					12		
194		261.98281					14		
195		262.18003					60		
196	262.99140	30							
197	266.98537	82							
198	268.98219	-0.000231	-0.00000085	283					
199	268.98242	273.98315	0.00001597	0.00000005			18		
200		276.16000			166				
201		277.16340			36				
202		278.98394			39				
203		280.98244			0.00001597	0.00000005	606		
204		281.98588			0.000135	0.00000045	42		
205		284.16833					11		
206		285.98580					48		
207		286.18177					23		
208		290.98531					45		
209		292.98256					0.000135	0.00000045	301
210		293.98484					-0.000148	-0.00000048	22
211		297.98315							21
212		298.17563							10
213		299.18511							13
214	300.19399	18							
215	302.17386	14							
216	302.98438	9							
217	304.98227	-0.000148	-0.00000048	119					
218	312.98633	314.20880	316.18840	15					
219	314.20880			10					
220	316.18840			40					

По известным значениям масс ионов и их погрешностей может быть произведено автоматическое определение элементного состава в предположении, что в их состав входят атомы углерода, водорода, азота и кислорода.

Информация, полученная при обработке масс-спектров, выводится по выбору: а) на цифровое печатающее устройство; б) на перфоленту; в) на цифровой магнитофон; г) на устройство отображения «Растр». Наиболее наглядным является представление результатов с помощью «Растра» — электронного устройства отображения спектроаналитической информации с собственной регенеративной памятью. Информация выводится на экран в виде графиков, таблиц, а также структурных формул. Предусмотрены возможности оцифровки линий спектра и точек графика, увеличения масштаба изображения, редактирования и т. д.

К настоящему времени аналитические возможности масс-спектрометра еще более расширены за счет применения неэлектронных методов ионизации: ионизации в сильном электрическом поле и химионизации. С этой целью разработаны соответствующие источники ионов, блоки питания и вспомогательные устройства, сочленяющиеся с масс-спектрометром.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hinterberger H., Koenig L. A.*, in: *Advances in mass spectrometry*. V. 1. Oxford, 1959.
2. *Александров М. Л., Галль Л. Н., Саченко В. Д.*, *Научные приборы*, 1976, № 12, с. 26.
3. *Voerboom A. J. H.*, *Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 1972, v. 8, p. 475.
4. *Ewald H., Saueermann G.*, *Z. Naturforsch.*, 1959, Bd 14a, S. 137.
5. *Кельман В. М., Назаренко Л. М., Якушев Е. М.*, *ЖТФ*, 1972, т. 17, с. 963.
6. *Саченко В. Д., Фридлянский Г. В.*, *ЖТФ*, 1980, т. 50, с. 1982.
7. *Herzog R.*, *Phys. Z.*, 1940, Bd 41, S. 23.
8. *Галль Р. Н., Саченко В. Д., Фридлянский Г. В.*, *ЖТФ*, 1979, т. 49, с. 1491.
9. *Ганзбург-Преснов В. С., Клешково Е. М., Фрейцис А. Д., Фридлянский Г. В.* Регулируемая щелевая диафрагма. Авт. свид. № 672671. — Бюл. изобр., 1979, № 25.
10. *Веселова Л. К., Галль Л. Н., Комаров М. С., Фридлянский Г. В.*, *ПТЭ*, 1971, № 4, с. 173.
11. *Борнгардт А. Ф., Вершевский В. Б., Галль Р. Н., Гольдин А. А., Ланин Е. В., Фридлянский Г. В.*, в кн.: *Международная научно-техническая конференция «Научприбор СЭВ-78»*. Тезисы докладов. М., 1978, с. 51.
12. *Борнгардт А. Ф., Додонов А. Ф., Ланин Е. В., Павленко В. А., Разников В. В., Гальрозе В. Л., Фридлянский Г. В., Шутов М. Д.* Устройство для определения массы пиков масс-спектрометра высокого разрешения. Авт. свид. № 512419. — Бюл. изобр., 1976, № 16.