

*УДК 621.384.8:525.7*

Масс-спектрометры для исследования атмосферы Земли и планет. Павленко В. А., Бережковский М. А., Климович В. Г., Левина Г. Н., Озеров Л. Н., Пушкнина М. А., Слущкий М. Е. — В кн.: Приборы для научных исследований и автоматизация эксперимента. Л., «Наука», 1982, с. 94—104.

Рассмотрены некоторые особенности масс-спектрометров, предназначенных для исследований верхних слоев земной атмосферы и атмосферы планет, требования к источникам ионов, способы откачки приборов и напуска в них исследуемых газов. Намечены пути повышения чувствительности этих масс-спектрометров. Лит. — 34 назв., ил. — 4, табл. — 3.

*В. А. Павленко, М. А. Бережковский, В. Г. Климовицкий,  
Г. Н. Левина, Л. Н. Озеров,  
М. А. Пушкина, М. Е. Слуцкий*

## **МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ**

Успехи в освоении космического пространства способствовали интенсификации научных исследований физико-химических свойств верхней атмосферы Земли и атмосферы планет.

С развитием космической радиосвязи появилась возможность прямых измерений структурных параметров среды на расстоянии в десятки миллионов километров от Земли.

Масс-спектрометрический метод исследований в космосе за последние десятилетия завоевал прочное место и повсеместно вытеснил менее совершенные методы измерений.

В настоящее время большое число исследовательских групп во всем мире ведут работы в области космической масс-спектрометрии, причем круг решаемых задач непрерывно расширяется.

Уже первый запуск радиочастотного масс-спектрометра в верхние слои земной атмосферы, проведенный Таунсендом в 1953 г., дал ценный материал о структуре атмосферы [1]. С тех пор из года в год растет число масс-спектрометрических исследований [2, 3].

Значительный вклад в масс-спектрометрические исследования космоса внесли советские ученые. Первые масс-спектрометрические исследования верхней атмосферы были выполнены В. Г. Истоминным в 1957—1958 гг. на третьем искусственном спутнике Земли и геофизических ракетах [4—6].

В связи с совершенствованием масс-спектрометрической аппаратуры ведутся планомерные исследования ионной и нейтральной компонент, производятся широтные разрезы атмосферы, изучаются суточные и сезонные вариации ионного и молекулярного состава, исследуется атмосфера Марса и Венеры. Получены ценные научные материалы. В частности, обнаружены тонкие слои ионов металлов внеземного происхождения — магния, кальция, кремния, железа [7]. Полученные данные по распределению и составу положительных ионов и их широтным вариациям дали возможность построить модель дневной ионосферы для периода

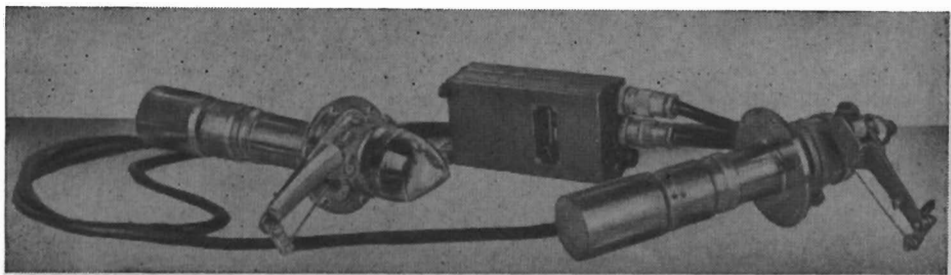


Рис. 1. Внешний вид масс-спектрометра МХ6407П для анализа верхних слоев атмосферы Земли.

максимальной солнечной активности. Исследования вариаций ионов гелия изменили сложившиеся взгляды на построение внешней ионосферы. Масс-спектрометрические исследования нейтрального состава атмосферы подтвердили эффект гравитационного разделения аргона и азота. Получены данные о температуре и парциальных концентрациях нижней термосферы и многие другие [5, 6, 8—13]. Впервые получены данные о составе атмосферы Венеры [14, 15].

Практически все космические масс-спектрометрические исследования в СССР проводятся на аппаратуре, разработанной СКБ аналитического приборостроения НТО АН СССР. В состав этой аппаратуры входит большая серия радиочастотных масс-спектрометров различного назначения МХ64 (рис. 1—3) и времяпролетные масс-спектрометры серии МХ54.

Масс-спектрометры являются сложными приборами, содержащими ряд физических и электронных устройств. Первоочередной задачей, без решения которой планомерное исследование космоса было бы невозможно, явилось создание малогабаритной, высоконадежной, экономичной по энергопотреблению масс-спектрометрической аппаратуры, обеспечивающей полностью автоматическую работу в крайне тяжелых эксплуатационных условиях широкого диапазона температур, давлений и механических воздействий [2, 3]. Ниже рассматриваются некоторые особенности таких приборов.

Масс-спектрометры, предназначенные для исследований ионной компоненты, не снабжаются источниками ионов.

Приборы для анализа нейтральной компоненты или комбинированные приборы комплектуются источником ионов, а в случае, если давление исследуемой среды велико, то и системами напуска и откачки.

Аналитические системы космических масс-спектрометров вакуумируются на Земле и вскрываются перед анализом, причем вакуумирова-

ние, исключая влияние десорбции на результаты измерений, желательно и для приборов, предназначенных для исследований ионной компоненты.

Требования к источнику ионов достаточно противоречивы.

Для повышения чувствительности желателен большой ток эмиссии, однако при повышении тока эмиссии возрастает эффект, вызванный вторичными процессами в источнике, растет десорбция и увеличивается потребляемая мощность. Повышение надежности катода достигается снижением рабочей температуры, разервированием и применением материалов, малочувствительных к повышенному давлению.

В случаях, когда давление анализируемой среды не превышает допустимого рабочего давления в анализаторе, а также при анализе ион-

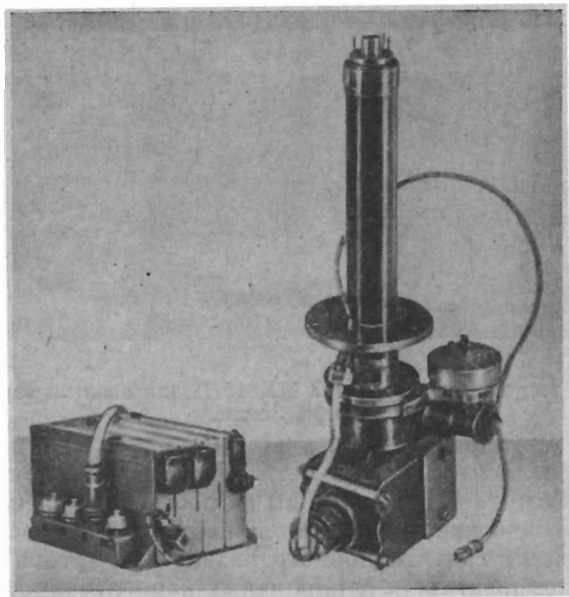


Рис. 2. Внешний вид масс-спектрометра МХ6409 для анализа атмосферы Марса.

ного состава откачные устройства не требуются. При более высоких давлениях исследуемой среды, в частности при планетных исследованиях, приборы снабжаются устройствами откачки и напуска.

В последние годы в качестве откачных высоковакуумных устройств используются магнитоэлектрические насосы, что объясняется такими преимуществами этих насосов, как практически неограниченный срок службы, быстрое создание ультравысокого вакуума, большая производительность на единицу массы и низкая потребляемая мощность. Недостатки магнитоэлектрических насосов, такие как невысокая скорость откачки инертных газов и «память», преодолеваются введением дросселирования и специальными методами обработки рабочих поверхностей насоса.

Диапазон измеряемых масс в большинстве экспериментов находится в пределах от атомарного водорода до ксенона, а необходимое разрешение не превышает 100.

В приборах для высотных разрезов на ракетах существенной характеристикой является быстроедействие, причем для увеличения последнего используется как метод развертки отдельных участков спектра, так и дискретный режим работы по заранее выбранным компонентам.

При необходимости повысить чувствительность в быстродействующих приборах, например времяпролетных, применяются ионно-электронные преобразователи.

Стремление повысить чувствительность в условиях значительных диапазонов давлений, например при вертикальных разрезах атмосферы, определило динамический диапазон измерений космических масс-спектрометров, который обычно составляет 4—5 порядков.

Если в первых масс-спектрометрических экспериментах в космосе спектр масс передавался по телеметрическому каналу на Землю в реальном масштабе времени, то с увеличением расстояний, времени работы приборов и соответствующим ростом информации наблюдается тенденция обрабатывать сигнал на борту, использовать дискретную настройку на пики масс, применять запоминающие и вычислительные устройства.

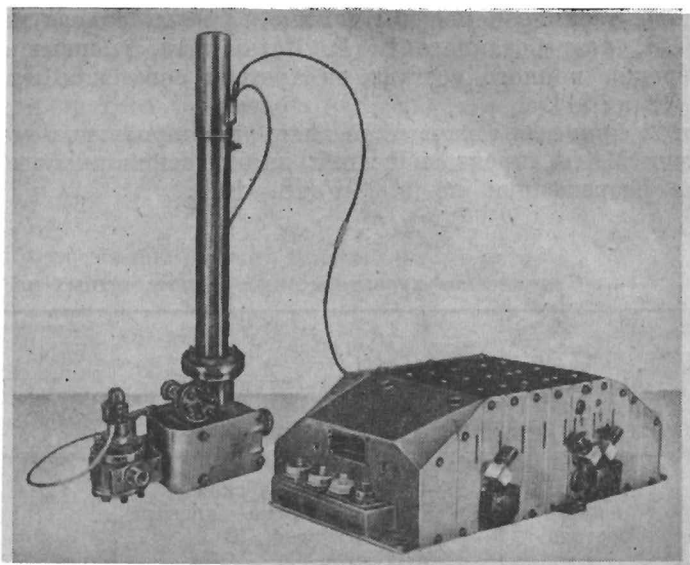


Рис. 3. Внешний вид масс-спектрометра MX6411 для анализа атмосферы Венеры.

Все эти меры позволяют резко увеличить количество поступающей информации [2].

Радиочастотные масс-спектрометры типа MX6401, MX6403 успешно использовались для вертикального ракетного зондирования [6—11]. Приборы MX6405 позволили провести длительные исследования ионного и нейтрального состава атмосферы Земли на больших высотах на спутниках серии «Электрон» [16].

Масс-спектрометрическая установка, состоящая из двух радиочастотных масс-спектрометров MX6407 и MX6407М, позволила получить интересные данные на объекте «вертикальный космический зонд» [17]. Большое количество исследований проведено с помощью радиочастотных масс-спектрометров типа MX6407П, серийно выпускаемых сумским заводом электронных микроскопов им. 50-летия ВЛКСМ [10, 12, 13]. На времяпролетных масс-спектрометрах MX5401, MX5402 проведены исследования нейтрального состава верхней атмосферы с высоким разрешением по высоте [18, 19]. С помощью приборов MX6409 впервые начаты исследования атмосферы Марса [20]. Ценные результаты исследований атмосферы Венеры получены на приборах MX6411, установленных на спускаемых аппаратах станций «Венера-11» и «Венера-12». Этими приборами обнаружена аргоновая аномалия в атмосфере Венеры [14, 15].

В рамках международного сотрудничества ведутся совместные работы по масс-спектрометрическим исследованиям в космосе. В частности, осуществлялись запуски отечественных радиочастотных масс-

спектрометров на ракетах зарубежного производства во Франции и Индии. В рамках СЭВа ведется работа с учеными социалистических стран как в плане научных исследований, так и в плане аппаратурных разработок.

Ниже рассмотрены характерные особенности космических масс-спектрометров, разработанных СКБ аналитического приборостроения НТО АН СССР.

В табл. 1 приведены основные характеристики радиочастотных масс-спектрометров серии МХ64, предназначенных для исследований ионного состава, а также нейтральных компонент на высотах более 100 км [16, 21—23].

В этой же таблице помещены данные радиочастотного масс-спектрометра РМС-1, разработанного В. Г. Истоминым, впервые осуществившего измерения ионного состава на третьем советском искусственном спутнике Земли [4].

В табл. 2 приведены характеристики времяпролетных масс-спектрометров серии МХ54, предназначенных для решения аналогичных задач с высоким разрешением по высоте [18, 19].

Т а б л и

Технические характеристики радиочастотных масс-спектрометров

Модель	Назначение	Диапазон масс, а. е. м.	Режим работы	Время развертки спектра, с	Разрешающая способность на уровне 10% высоты пика
РМС-1	Анализ ионного состава	6—48	Циклическая развертка спектра масс	1.7	—
МХ6401	Анализ нейтрального и ионного составов	1—4, 12—56	Циклическая развертка спектра масс последовательно в двух диапазонах	2.5—3	45
МХ6402	То же	1—4, 12—56	То же	25—30	45
МХ6403	» »	1—4, 12—60	» »	2.5—3	45
МХ6404	Анализ ионного состава	1, 12, 14, 16	Регистрация фиксированных масс	—	15
МХ6405	Анализ нейтрального и ионного составов	1—2, 12—34	Циклическая развертка спектра масс последовательно в двух диапазонах	2.5—3	15
МХ6406	То же	12, 14, 16, 18, 28, 30, 32, 40, 44	Регистрация фиксированных масс	—	15
МХ6407П	» »	1—4, 12—48	Циклическая развертка спектров масс одновременно в двух диапазонах	2.7	5 (для диапазона 1—4 а. е. м.), 15 (для диапазона 12—48 а. е. м.)

В табл. 3 даны характеристики планетных радиочастотных масс-спектрометров серии МХ64, снабженных системами высоковакуумной откачки и системами напуска.

Для серии радиочастотных масс-спектрометров создан ряд малогабаритных цельнометаллических виброустойчивых анализаторов с различной разрешающей способностью. Плоскопараллельные сетки этих анализаторов выполнены путем закрепления нитей диаметром 12 мкм гальваническим способом и обладают высокой прозрачностью для ионного пучка. В области коллектора ионов установлены специальные сетчатые электроды, способствующие снижению фоновых токов [24].

При развертке спектра в радиочастотном анализаторе ускоряющим напряжением в целях меньшего влияния на измерения начальных разбросов энергий ионов применяется разбивка диапазона масс на два последовательно разворачиваемых поддиапазона, например в масс-спектрометре МХ6401 [21].

Примером другого решения этой задачи является вариант с двумя анализаторами на легкие и средние массы, работающими одновременно от единого электронного блока. Такое решение реализовано в масс-спек-

та 1

серии МХ64 для исследований ионного и нейтрального составов

Рабочее давление, мм рт. ст.	Парциальная чувствительность по аргону при анализе нейтрального состава, мм рт. ст.	Анализатор, число циклов	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность в режиме анализа, ВА		Масса, кг
				нейтрального состава	ионного состава	
—	—	7 + 5	Сернисто-цинковый аккумулятор и батарея из окислортутных элементов, обеспечивающих напряжение 450, 150, 100, 80, 50, 24, 12, 6, 3 В и др.	—	25	20
$1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 + 9 + 4 + 7$	27.5	6	5.5	3.3
$1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-4}$	—	$5 + 9 + 4 + 7$	27.5	6	5.5	3.3
$1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 + 9 + 4 + 7$	27.5	4	3	2
$1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-4}$	—	7 + 2	14	—	2.5	1.6
$1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-10}$	7 + 2	14	4	3	2
$1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$	7 + 2	14	4	—	1.8
$\leq 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11}$	Два анализатора: $2 + 2$ и $7 + 2$	14	5.2	3.2	2.5

## Технические характеристики времяпролет

Модель	Назначение	Диапазон масс, а. е. м.	Режим работы — частота повторения масс-спектров	Время развертки спектра, мкс
МХ5401	Анализ нейтрального состава	1—100	600 Гц	16
МХ5402	То же	1—100	40 кГц	20
МХ5403	Анализ нейтрального и ионного составов	1—100	3 кГц	20

Табл и

## Технические характеристики радиочастотных масс-

Модель	Назначение	Диапазон масс, а. е. м.	Режим работы	Время развертки спектра, с
МХ6408	Анализ химического состава атмосферы Марса	18, 28, 32, 40, 44	Регистрация фиксированных масс	—
МХ6408М	То же	12—48	Циклическая развертка спектра масс	4
МХ6409	» »	12—90	То же	4
МХ6411	Анализ химического состава атмосферы Венеры	12—90	» »	7

трометре МХ6407 [23] и обеспечивает максимальную чувствительность для каждого анализатора [12]. Кроме того, одновременная регистрация легких и средних масс позволяет повысить информативность при вертикальных зондированиях.

В последних моделях радиочастотных масс-спектрометров серии МХ64, в частности в приборах для исследования Марса и Венеры, для исключения дискриминации амплитуды массовых пиков по диапазону и расширения диапазона масс применена развертка спектра изменением частоты при постоянном ускоряющем напряжении [25].

Частота изменяется в широких пределах путем воздействия магнитного поля на ферритовый сердечник контура генератора.

Представляет интерес способ дискретной циклической настройки на вершины нескольких, заранее выбранных пиков спектра масс, как наиболее выгодный с точки зрения передачи информации. Реализация этого способа в масс-спектрометре МХ6408, рассчитанного на анализ пяти компонент, позволила сузить полосу пропускаемых частот канала измерения ионных токов и тем самым повысить чувствительность. Переключение частот осуществляется коммутацией контуров генератора диодными переходами [26].

Созданы высокоэффективные источники ионов с продольной и поперечной ионизацией молекулярного пучка, в которых применены оксидные и оксидно-ториевые катоды с малым уровнем газовой выделенности. Нити като-



## ных масс-спектрометров серии МХ54

Разрешающая способность на уровне 10% высоты пика	Рабочее давление, мм рт. ст.	Парциальная чувствительность по аргону при анализе нейтрального состава, мм рт. ст.	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, ВА	Масса, кг
20	$5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$	14	18	3
20	$5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$	14	21	3.7
30	$5 \cdot 10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-9}$	14	50	9

## спектрометров серии МХ64 для исследования атмосферы планет

Разрешающая способность на уровне 10% высоты пика	Давление исследуемой среды, не выше	Предельная чувствительность, %		Число циклов	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, ВА	Масса, кг
		O <sub>2</sub>	Ag				
15	25 мм рт. ст.	—	—	7 + 2	27	8	3.5
15	5 мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	7 + 2	27	7	4.15
40	7 мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	11 + 8 + 5	27	8	4.3
40	100 атм.	$5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$	11 + 8 + 5	27	17.5	10.5

дов дублированы, что в сочетании с низкой рабочей температурой обеспечивает высокую надежность. В таких источниках при сравнительно низких потенциалах ионизации, не превышающих 70 В, обеспечивается электронный ток эмиссии до нескольких миллиампер при малом расходе энергии на нагрев нити.

Регулировка тока эмиссии в таких источниках осуществляется изменением электрического поля в области катода. Таким же образом производится изменение чувствительности в режиме анализа нейтрального состава [23].

Применение источника ионов с поперечной ионизацией позволило приблизить область ионизации к входному отверстию анализатора и тем самым уменьшить вероятность рекомбинации атомарных газов на поверхностях [12].

При переходе с режима нейтрального анализа на режим анализа ионной компоненты на электроды источника ионов подается отрицательное напряжение, образующее затягивающее поле.

С целью снижения фоновых пиков тщательно обезгаженные анализаторы заполняются смесью контрольных газов при низком давлении.

Соединение анализатора с исследуемой атмосферой осуществляется разрушением стеклянного патрубку, в котором размещен газопоглотитель. Наличие контрольной смеси дает возможность проверить работу аппаратуры вплоть до момента вскрытия анализатора.

Для анализа атмосферы Марса были созданы радиочастотные масс-спектрометры МХ6408, МХ6408М, МХ6409 с системами откачки и напуска, обеспечивающими молекулярный характер натекания при давлении на входе несколько миллиметров ртутного столба (рис. 4, а). Перепад давления между исследуемой средой и анализатором осуществляется на диафрагме с малым проходным отверстием. Система напуска сообщается с исследуемой средой путем вскрытия входного стеклянного патрубка ударным механизмом [27]. После вскрытия диафрагма напуска оказывается непосредственно в исследуемом потоке, что обеспечивает малую газо-

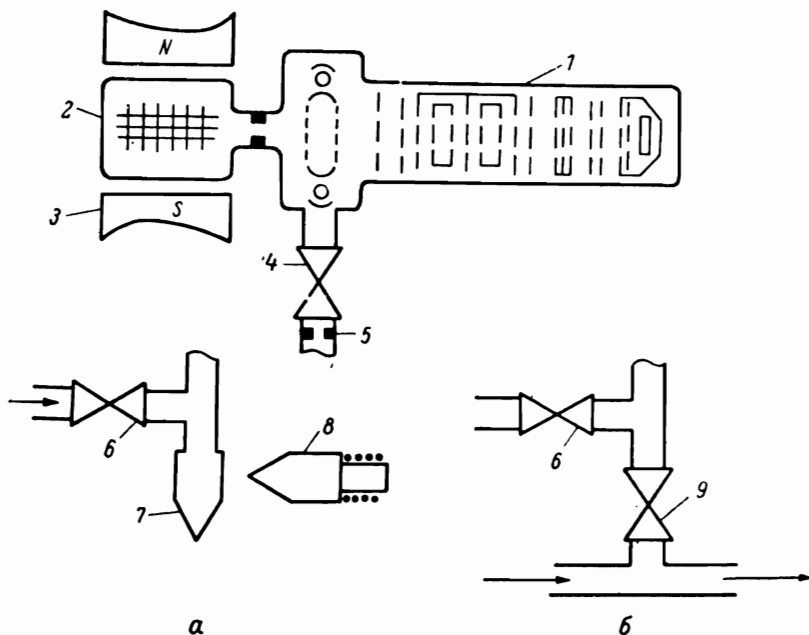


Рис. 4. Блок-схема аналитической системы масс-спектрометра для анализа атмосферы Марса (а) и Венеры (б).

1 — анализатор; 2 — магниторазрядный насос; 3 — магнит; 4 — технологический вентиль; 5 — диафрагма напуска; 6 — вентиль откачки и калибровки; 7 — стеклянный патрубок; 8 — ударный механизм; 9 — пьезострикционный клапан напуска.

динамическую постоянную времени, практически не превышающую 0.1 с.

Специальный технологический вентиль позволяет проводить наземную калибровку и проверку прибора по газовым смесям без вскрытия входного патрубка.

Для откачки анализаторов на высокий вакуум была создана серия малогабаритных магниторазрядных насосов диодного типа с равномерным распределением откачиваемого потока по площади активных поверхностей. В целях повышения эффективности откачки применена специальная обработка насоса инертным газом, значительно увеличивающая производительность и снижающая эффекты «памяти» насоса на время, необходимое для сеанса работы на планете. В анализаторе с таким насосом достигается предельный вакуум порядка  $1 \cdot 10^{-10}$  мм рт. ст., а адсорбция с  $1 \text{ см}^2$  внутренней поверхности составляет около  $3 \cdot 10^{-15}$  л·мм рт. ст.·с<sup>-1</sup>.

Для исследования газовой среды с высоким давлением создана оригинальная двухступенчатая система напуска, реализованная в радиочастотном масс-спектрометре МХ6411, предназначенном для анализа атмосферы Венеры (рис. 4, б). Напуск газов ведется циклически, малыми порциями, в связи с чем также циклически меняется давление в анализаторе.

В целях значительного повышения чувствительности по инертным газам в приборе МХ6411 при исследовании атмосферы Венеры впервые был применен способ циклического перевода магниторазрядного насоса из режима активной на режим пассивной откачки путем периодического снятия высокого напряжения. В режиме пассивной откачки с отключенным питанием сохраняется высокая скорость откачки насоса для активных газов и резко падает скорость откачки инертных газов [28].

Реальная чувствительность масс-спектрометров в большой степени определяется характеристиками канала измерения ионных токов. К этому узлу предъявляются противоречивые требования: измерение крайне малых токов в относительно широкой полосе частот в сочетании с помехоустойчивостью, невосприимчивостью к механическим воздействиям, магнитным полям и радиации.

До последнего времени в каналах измерения ионных токов космических масс-спектрометров в основном применялись усилители постоянного тока с электрометрической лампой на входе. Широкое распространение в отечественных моделях масс-спектрометров получил малогабаритный экономичный электрометрический стержневой пентод типа ЭМ-10 с током управляющей сетки не более  $1 \cdot 10^{-14}$  А. Большинство моделей космических масс-спектрометров, разработанных СКБ, выполнены на различных модификациях широкополосных электрометрических усилителей с применением этой лампы [29—31].

В последние годы созданы более совершенные электрометрические усилители с дифференциальной парой МОП-транзисторов на входе и интегральной усилительной схемой, малочувствительные к механическим воздействиям, магнитным полям и обладающие малым уровнем дрейфа [32].

Применение таких устройств в каналах измерения ионных токов планетных масс-спектрометров позволило снизить энергопотребление, уменьшить габариты и повысить надежность приборов.

Стремление повысить чувствительность, расширить диапазон исследуемых давлений, снизить погрешность измерений заставляет конструкторов аппаратуры искать новые пути. Классический метод усиления ионных токов с преобразованием тока в напряжение на высокоомном сопротивлении, помимо высокой погрешности, характерен относительно небольшим динамическим диапазоном измерений, что сопряжено с трудностями в переключении входных резисторов. Здесь определенный выигрыш дадут электронно-ионные преобразователи, усиление на переменном токе с модуляцией сигнала, применение интегрирующих усилителей [33].

Представляет интерес использование для откачки анализатора вакуумированных полостей, находящихся перед стартом в сложном, занимающем малый объем состоянии [34].

Большие возможности заложены в использовании для космических исследований хромато-масс-спектрометров. Такая система расширяет круг задач, решаемых прибором при изучении сложных органических веществ, исследовании структуры планетного вещества и данных о биологической активности на планетах [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таунсенд Джон В. мл., Мидоус Эдит Б., Прессли Элинор С., в кн.: Ракетные исследования верхней атмосферы. Т. 1. Под ред. Р. Л. Ф. Бойда и М. Дж. Ситона. М., 1957, с. 196.
2. Джейрам Р. Масс-спектрометрия. Теория и приложения. Пер. с англ. М., 1969.
3. Масс-спектрометрия верхней атмосферы Земли. Пер. с англ. Под ред. А. Д. Данилова и В. Г. Истомина. Л., 1972.
4. Истомин В. Г., Искусств. спутники Земли, 1959, № 3, с. 98.
5. Истомин В. Г., Искусств. спутники Земли, 1960, № 4, с. 171.
6. Истомин В. Г., Искусств. спутники Земли, 1961, № 7, с. 64.
7. Истомин В. Г., Искусств. спутники Земли, 1961, № 11, с. 98.

8. *Похунков А. А.*, Ионосферные исследования, 1965, № 14, с. 26.
9. *Похунков А. А.*, Космические исследования, 1963, т. 1, № 1, с. 147.
10. *Похунков А. А.*, Тр. Инст. прикладн. геофизики, 1973, т. 17, с. 92.
11. *Похунков А. А., Горбунов С. В.*, Тр. Инст. прикладн. геофизики, 1973, т. 17, с. 101.
12. *Жлудько А. Д., Полосков С. М., Похунков А. А., Тесленко В. П., Шидловский А. А., Иванов Ю. Ф.*, Метрология и гидрология, 1970, № 3, с. 45.
13. *Похунков А. А., Полосков С. М., Тулинов Г. Ф., Жиро А., Сиалон Г.*, Тр. Инст. прикладн. геофизики, 1973, т. 17, с. 106.
14. *Истомин В. Г., Гречнев К. В., Кочнев В. А., Павленко В. А., Озеров Л. Н., Климовицкий В. Г., Слуцкий М. Е.*, Письма в АЖ, 1979, т. 5, № 1, с. 3.
15. *Istomin V. G., Grechnev K. V., Kotchnev V. A., Pavlenko V. A., Slutsky M. E., Ozerov L. N., Klimovitsky V. G., Lévina G. N.*, USSR, COSPAR, India, Bagalore, 1979, p. 259.
16. *Зархин Б. И., Истомин В. Г., Рафальсон А. Э., Слуцкий М. Е.*, Космические исследования, 1965, т. 3, № 5, с. 768.
17. *Ершова В. А., Сивцева Л. Д., Ярин В. И.*, Космические исследования, 1971, т. 9, № 5, с. 741.
18. *Кудрявцев Г. Н., Левина Г. Н., Мартынкевич Г. М., Озеров Л. Н., Павленко В. А., Рафальсон А. Э.*, Тр. ЦАО, 1967, т. 77, с. 33.
19. *Жуков А. П., Кудрявцев Г. Н., Левина Г. Н., Либман М. Л., Мартынкевич Г. М., Ненарокомова В. Т., Озеров Л. Н., Павленко В. А., Рафальсон А. Э., Шутов М. Д.*, Тр. ЦАО, 9771, т. 127, с. 3.
20. *Истомин В. Г., Гречнев К. В., Озеров Л. Н., Павленко В. А., Слуцкий М. Е., Цветков В. Н.*, Космические исследования, 1975, т. 13, № 1, с. 16.
21. *Павленко В. А., Рафальсон А. Э., Слуцкий М. Е., Цвейман Г. А., Шутов М. Д.*, ПТЭ, 1960, № 6, с. 89.
22. *Павленко В. А., Рафальсон А. Э., Шутов М. Д.*, Космические исследования, 1963, т. 1, № 2, с. 286.
23. *Павленко В. А., Зархин Б. И., Рафальсон А. Э., Слуцкий М. Е.*, Космические исследования, 1966, т. 4, № 3, с. 457.
24. *Слуцкий М. Е., Цигельман Г. Е.*, ЖТФ, 1966, т. 36, с. 1132.
25. *Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.*, ПТЭ, 1976, № 3, с. 129.
26. *Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.*, ПТЭ, 1969, № 3, с. 160.
27. *Слуцкий М. Е.* Разбивающее устройство для вскрытия закрытых емкостей. Авт. свид. № 286335. — Бюл. изобр., 1971, № 34.
28. *Озеров Л. Н., Павленко В. А., Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.* Способ масс-спектрометрического анализа дуплетов и мультиплетов масс. Авт. свид. № 488132. — Бюл. изобр., 1975, № 38.
29. *Слуцкий М. Е., Зархин Б. И., Пушкина М. А.*, Космические исследования, 1963, т. 1, № 2, с. 296.
30. *Слуцкий М. Е.*, ПТЭ, 1965, № 5, с. 117.
31. *Вершевский В. Б., Жердин М. В., Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.*, ПТЭ, 1970, № 1, с. 135.
32. *Озеров Л. Н., Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.*, ПТЭ, 1975, № 1, с. 140.
33. *Пушкина М. А., Слуцкий М. Е.*, Измерительная техника, 1977, № 3, с. 60.
34. *Павленко В. А., Рафальсон А. Э., Слуцкий М. Е., Шутов М. Д.* Масс-спектрометр для химического анализа состава планет. Авт. свид. № 366400. — Бюл. изобр., 1973, № 7.