

УДК 621.384.8

© Н. Д. Семкин, Д. В. Родин, И. В. Пияков, Р. А. Помельников

## БОРТОВОЙ ПЫЛЕУДАРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

В статье приведены две возможные конструкции пылеударного масс-спектрометра, разработанные с учетом требований увеличения размеров мишени при одновременном сохранении характеристик конструкции на необходимом уровне. Рассмотрены вопросы моделирования прибора с помощью численного расчета электростатического поля в тракте масс-спектрометра, а также расчетов траекторий заряженных частиц. Для каждой из конструкций приведены результаты моделирования зависимостей характеристик прибора, таких как разрешающая способность и коэффициент сбора, от места соударения частицы и мишени. На основе полученных результатов сделан вывод об оптимальном размере сферического корректора и отверстия диафрагмы приемника. Приведено описание экспериментального стенда для проверки пылеударных масс-спектрометров, а также проверки соответствия полученных характеристик данным моделирования.

*Кл. сл.:* пылеударный масс-спектрометр, времяпролетный масс-спектрометр, масс-анализатор, масс-рефлектор, линейное ионное зеркало, параболический отражатель, микрометеорит, микрометеороид

### ВВЕДЕНИЕ

Времяпролетные масс-спектрометры находят широкое применение для решения ряда задач при проведении космических экспериментов, для изучения химического состава космической пыли, космического мусора, собственной атмосферы космических аппаратов, грунта космических объектов, газопылевых хвостов комет и т. д.

Так, например, пылеударные масс-спектрометры используются для анализа микрометеоритных потоков [1–3]. В таких масс-спектрометрах ввиду большого энергетического разброса ионов, возникающих в результате ударного взаимодействия частицы-ударника и мишени, как правило, достаточно высокую разрешающую способность получают путем использования больших ускоряющих напряжений (порядка 1–1.5 кВ) [1–4].

В соответствии с известными данными о распределении микрометеороидных потоков в околоземном пространстве и дальнем космосе, а именно ввиду малой вероятности ударных взаимодействий пылевых частиц с мишенью прибора, рабочая площадь чувствительной поверхности пылеударного масс-спектрометра должна быть как можно большей при сохранении характеристик прибора. Авторами предложены реализации конструкций, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

– минимизация зависимости выходных характеристик от места соударения;

– высокая разрешающая способность;  
– высокая чувствительность;  
– минимизация габаритно-массовых характеристик спектрометра.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОКУСИРОВКИ В ПЫЛЕУДАРНОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ

На основе вышеприведенных требований, предъявляемым к приборам, которые используются при проведении космических экспериментов, с целью обеспечения взаимопротиворечивых характеристик были разработаны две конструкции "а" и "б" пылеударного масс-спектрометра, приведенные на рис. 1, со следующими расстояниями между сетками:

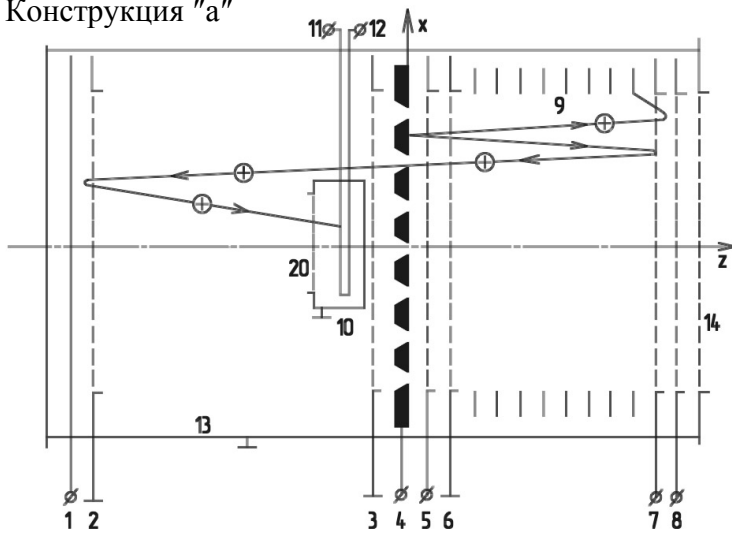
$$l_{12} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad l_{\text{он}} = 245 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$l_{34} = l_{45} = l_{56} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad l_{67} = 83.5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$l_{78} = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

В традиционных конструкциях масс-спектрометров бесполовое пространство располагается перед мишенью [5, 6]. В предлагаемых конструкциях масс-спектрометров в мишени выполнены прорезы, пропускающие ионы из одной части конструкции в другую. Особенностью конструкции, приведенной на рис. 1, является мишень с системой равномерно расположенных отверстий,

## Конструкция "а"



## Конструкция "б"

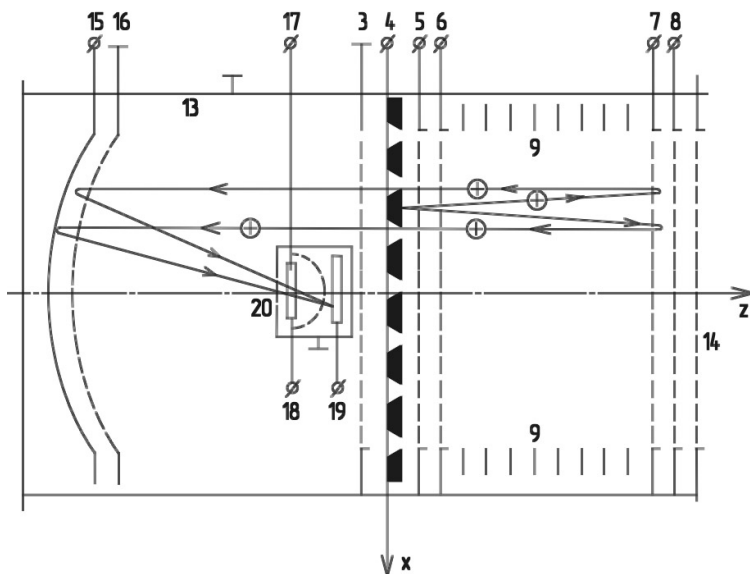


Рис. 1. Конструкции масс-спектрометра.

(1, 2) — отражатель ионов, причем на сетке 2 нулевой потенциал, на пластине 1  $U_{\text{отр}} = 145$  В; (2, 3) — сетки, ограничивающие бесполое пространство; 4 — мишень с потенциалом  $+U_M = 100$  В; (4, 5) — ускоряющий промежуток, на сетке 5 потенциал  $U_{\text{уск}} = -300$  В; (5, 6) — гасящий промежуток, служащий для уменьшения энергии ионов и растягивания спектра во времени, на сетке 6 нулевой потенциал; (6, 8) — фокусирующее зеркало; (6, 7) — первый рефлектор фокусирующего зеркала, на сетке 7 потенциал  $+U_1 = 125$  В; (7, 8) — второй рефлектор фокусирующего зеркала, на сетке 8 потенциал  $+U_2 = 145$  В; 9 — система колец, служащая для создания линейного изменяющегося потенциала в области первого рефлектора; 10 — корпус приемника с микроканальной пластиной (МКП); 11 — собирающий потенциал приемника  $U_{\text{соб}} = -300$  В; 12 — питающий потенциал МКП; 13 — корпус датчика с входным окном 14; (15, 16) — параболический отражатель ионов, причем на электродах 15 и 16 потенциал, соответствующий потенциалам системы (1, 2); 17 — корректор разрешения; 18 и 19 — возможные положения приемника конструкции "б"; 20 — входное отверстие приемника

минимизирующая эффект затенения приемника. В основе конструкции "б" лежит свойство параболоида: длина каждой траектории, параллельной оси Z, не зависит от места соударения частицы ударника и мишени и равна длине бесполого пространства в конструкции "а", рефлектор рассчитан в соответствии с методикой, приведенной в [7].

С целью верификации полученных характеристик приборов было произведено моделирование работы масс-спектрометров с использованием уравнений движения заряженных частиц в электростатических полях. Для расчета электростатических полей внутри прибора был применен экс-

траполяция метод Либмана, предложенный Франкелом [8], Янгом [9], который является наиболее универсальным и полезным из всех быстро сходящихся итерационных методов. Этот метод эквивалентен последовательной узловой релаксации с перебором (отсюда название экстраполяционный). Он представляет собой развитие метода Либмана, основанное на введении коэффициента  $a$ :

$$A_{n,k}^{n+1} = A_{n,k}^n + \frac{a}{4} (A_{n+1,k}^n + A_{n,k+1}^n + A_{n-1,k}^n + A_{n,k-1}^n + h^2 W - A_{n,k}^n). \quad (1)$$

Здесь  $a$  является коэффициентом сходимости, или коэффициентом релаксации, определяющим степень перебора. Можно показать, что его значение должно находиться в пределах  $(1, 2)$ . Если  $a = 1$ , то уравнение (1) превращается в уравнение для обычного метода Либмана, а при  $a \geq 2$  процесс решения становится неустойчивым.

При работе с прямоугольными областями можно воспользоваться способом нахождения оптимального значения  $a$ , предложенным Янгом [10]:

$$a_b \approx 2 \left( 1 - \pi \sqrt{\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2}} \right), \quad (2)$$

где  $a_b$  — оптимальное значение коэффициента сходимости;  $p$  — количество узлов сетки по вертикали;  $q$  — количество узлов сетки по горизонтали.

Рассмотрим связь между потенциалом и напряженностью электрического поля. В результате расчетов мы получили матрицу потенциалов поля. Для расчета траекторий необходимо перейти от потенциала к напряженности электрического поля. В соответствии с уравнением Максвелла в случае

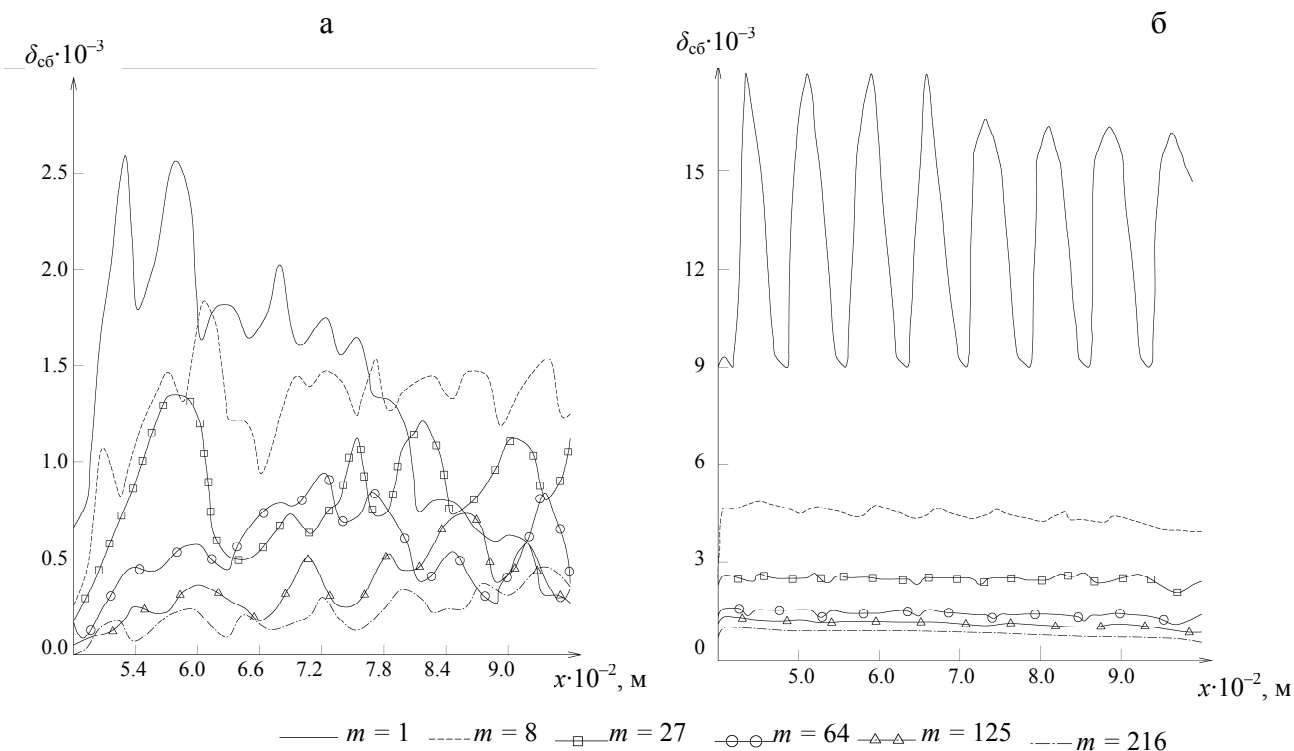
представления электрического поля в виде матрицы потенциалов можно перейти от частных производных к приращениям (при условии их достаточной малости):

$$\begin{cases} E_x \approx -\frac{\Delta V}{\Delta x}, \\ E_y \approx -\frac{\Delta V}{\Delta y}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $V$  — потенциал электрического поля. Расчет траекторий производился с использованием известных уравнений движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях.

Численный расчет траектории представляет собой дискретное движение частицы в поле с определенным шагом по времени, но логично предположить, что координаты частицы не будут совпадать с координатами узлов сетки потенциалов. Поэтому необходим уточненный расчет напряженности поля в точке расположения частицы.

Воспользовавшись уравнениями (3) и переходя от дифференциала к приращению времени, получим следующие уравнения, на основе которых будет составляться алгоритм:



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента сбора  $\delta_{cb}$  от координаты удара и массы ионов для конструкций "а" и "б". (Коэффициент сбора равен отношению принятых приемником ионов к общему количеству ионов  $\delta_{cb} = N_{пр} / N_{общ}$ )

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= x(t) + \left( v_x(t) + \frac{qE_x}{m} \Delta t \right) \Delta t, \\ y(t + \Delta t) &= y(t) + \left( v_y(t) + \frac{qE_y}{m} \Delta t \right) \Delta t, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $v_x, v_y$  — соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие скорости частицы в текущий момент времени.

Вопрос выбора шага времени  $\Delta t$  достаточно сложен, однако нужно заметить, что выбирать  $\Delta t$  необходимо так, чтобы приращение координат ( $x$  или  $y$ ) было хотя бы на порядок меньшим, чем шаг сетки потенциалов. Таким образом, необходимо выводить расчетное  $\Delta t$  во время полета частицы для возможности корректировки входного шага по времени  $\Delta t_{\text{оп}}$ , задаваемого оператором.

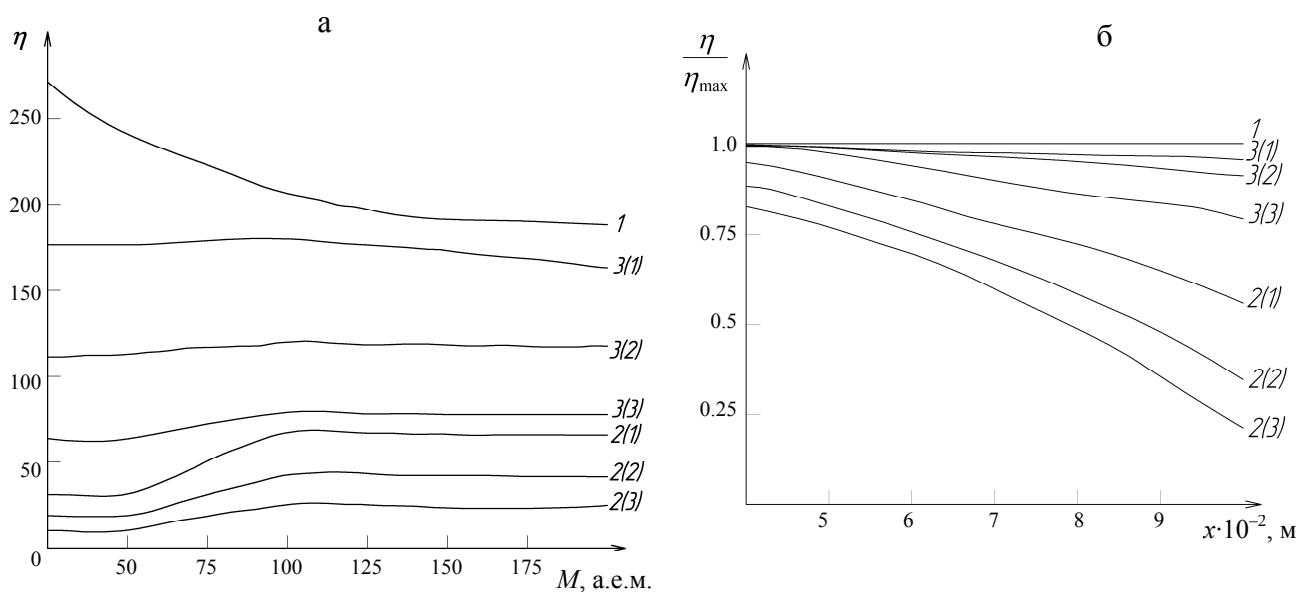
Результаты расчета коэффициентов сбора (см. определение в подписи к рис. 2) в зависимости от места соударения для конструкций "а" и "б" соответственно приведены на рис. 2, а, и рис. 2, б. (диаметр МКП — 56 мм, диаметр диафрагмы — 1 см).

Результаты моделирования зависимости разрешения конструкций масс-спектрометров от массы и координаты удара приведены на рис. 3: кривые, маркированные 1, — конструкция "а"; кривые

с маркой 2 — конструкция "б"; кривые 3 — конструкция "б" со сферическим корректором.

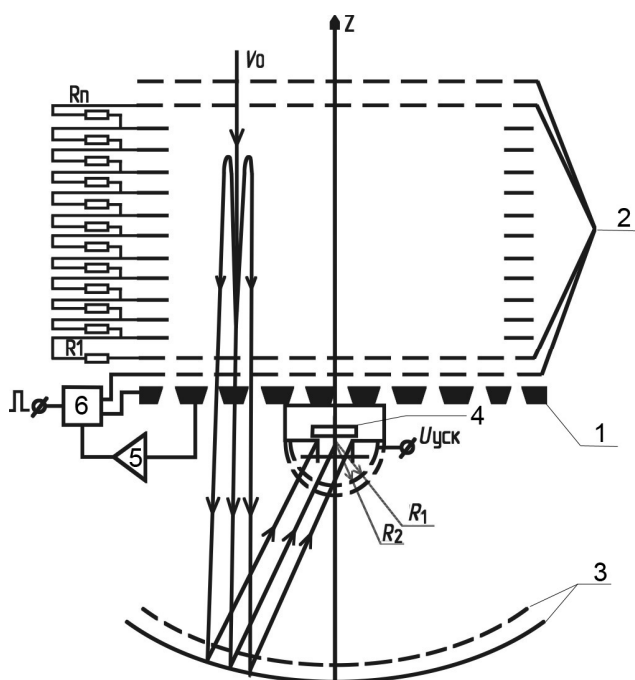
Как видно из рис. 2 и 3, конструкция "а" позволяет получить довольно высокое разрешение, не зависящее от координаты  $x$ . Однако из рис. 2 видно, что конструкция "а" обладает небольшим коэффициентом сбора водорода ( $m = 1$ ) при большой площади приемника, а также большим разбросом коэффициента сбора для разных точек мишени. Недостатком данной конструкции является различный характер зависимостей коэффициентов сборов для каждой массы от координаты  $x$ . Конструкция "б" позволяет избежать вышеприведенных недостатков конструкции "а". Расчетные параметры данной конструкции приведены на рис. 2 и 3. Из этих рисунков видно, что достоинством конструкции "б" является незначительный разброс значений коэффициента сбора, не зависящий от координаты удара  $x$ . Разрешение конструкции "б" невысоко и зависит от координаты  $x$ , что показано на рис. 3. Такое ухудшение разрешения объясняется тем, что не все траектории ионов параллельны оси  $Z$ .

Для устранения ухудшения разрешения, вызванного наклоном отражателя относительно приемника, используется диафрагмирование приемника и применение сферического корректора. Один из вариантов такой конструкции представлен на рис. 4.



**Рис. 3.** Зависимость разрешения конструкции от массового числа и координаты удара.

2 (1) —  $dg = 1.5 \cdot 10^{-2}$  м ( $dg$  — диаметр отверстия диафрагмы); 2 (2) —  $dg = 1.0 \cdot 10^{-2}$  м; 2 (3) —  $dg = 0.7 \cdot 10^{-2}$  м; 3 (1) —  $dg = 1.5 \cdot 10^{-2}$  м; 3 (2) —  $dg = 1.0 \cdot 10^{-2}$  м; 3 (3) —  $dg = 0.7 \cdot 10^{-2}$  м;  $x = 10$  см



**Рис. 4.** Конструкция "б" с диафрагмой перед приемником ионов и сферическим корректором  
1 — мишень; 2 — электростатическое зеркало; 3 — параболический отражатель ионов; 4 — приемник ионов; 5 — усилитель-формирователь; 6 — блок формирования выталкивающего импульса

При оптимальном сочетании диаметра сферы и диафрагмы, а также диаметра МКП и ее расстояния до сферы можно значительно улучшить разрешение без ухудшения других характеристик блока. Радиусы сеток  $R_1$  и  $R_2$  выбираются с учетом соотношения

$$0.1 < \frac{R_1 - R_2}{R_1} < 1. \quad (5)$$

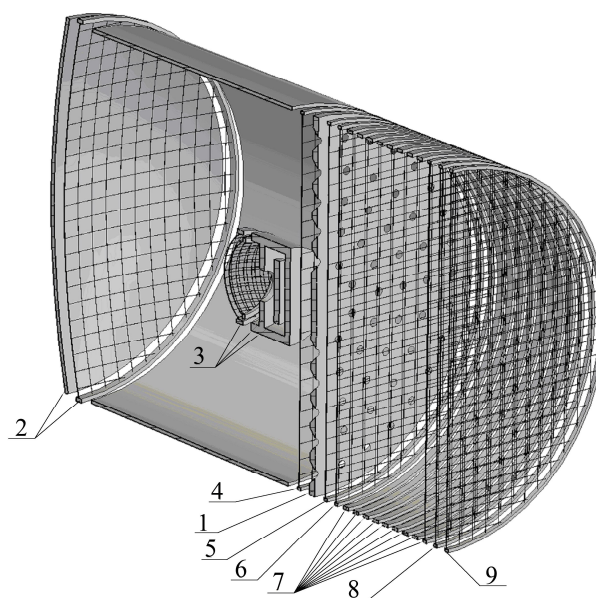
Такая конструкция "в" обладает характеристиками, превосходящими характеристики конструкций "а" и "б".

Моделирование конструкции было произведено для трех координат, 3D-модель конструкции приведена на рис. 5.

Результаты моделирования зависимости разрешения конструкции "в" от массы и координаты удара приведены на рис. 6, а, б, соответственно.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ УДАРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На основе проведенного моделирования был создан масс-спектрометр, показанный на рис. 7.



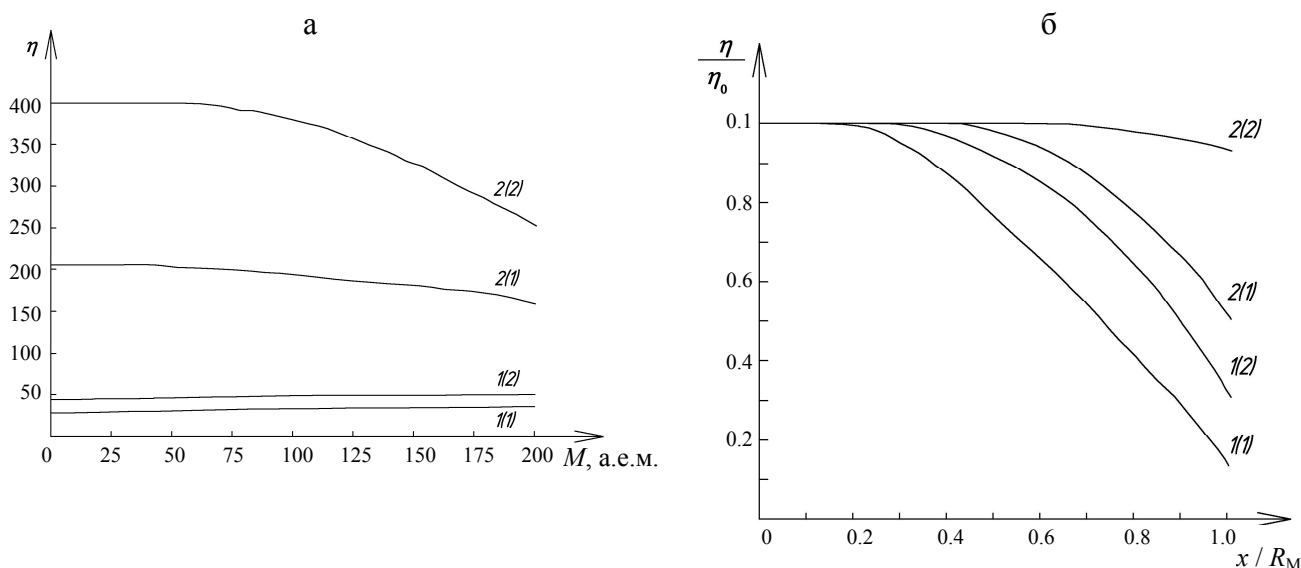
**Рис. 5.** 3D-модель конструкции "в".

1 — мишень; 2 — параболический отражатель; 3 — приемник ионов со сферическим корректором; 4 — сетка, ограничивающая бесполевое пространство; 5 — ускоряющая сетка; 6 — гасящая сетка; 7 — первый рефлектор зеркала, состоящий из восьми колец и сетки; 8 — сетка второго рефлектора; 9 — входная сетка

Его схематическое изображение представлено на рис. 4. Масс-спектрометр содержит мишень 1 с выполненными в ней отверстиями. На поверхность мишени нанесена серебряная пленка. Со стороны ударяющих в мишень частиц установлено электростатическое фокусирующее зеркало 2, а с другой стороны — параболический отражатель ионов 3, фокусирующий их на приемник 4. Образовавшиеся при ударе ионы выталкиваются импульсом, сформированным в промежутке мишень—сетка. Электронный импульс, образованный при ударе на мишени, через усилитель-формирователь 5 запускает блок формирования 6 выталкивающего импульса.

Образец бортового прибора для проведения лабораторных испытаний, показанный на рис. 7, обладает следующими характеристиками: общая длина 280 мм, диаметр прибора 240 мм, масса 1.3 кг, суммарная потребляемая мощность ~7 Вт (вместе с блоком обработки ионных спектров).

Диапазон ускоряемых частиц по скоростям составлял 1–20 км/с. Эксперименты выполнены с помощью электродинамического ускорителя [11] и генератора Ван де Граафа согласно методике, подробно описанной в [12].



**Рис. 6.** Зависимость разрешения конструкции от массового числа (а) и координаты удара (б). Кривая 1 — конструкция "б" со сферическим корректором; кривая 2 — конструкция "в" с оптимальными параметрами приемника; 1 (1) —  $dg = 1.0 \cdot 10^{-2}$  м ( $dg$  — диаметр отверстия диафрагмы); 1 (2) —  $dg = 0.7 \cdot 10^{-2}$  м; 2 (1) —  $dg = 1.0 \cdot 10^{-2}$  м; 2 (2) —  $dg = 0.7 \cdot 10^{-2}$  м.  $x$  — расстояние от оси прибора до места соударения;  $R_M$  — максимальное расстояние от оси прибора до места соударения, равное радиусу мишени



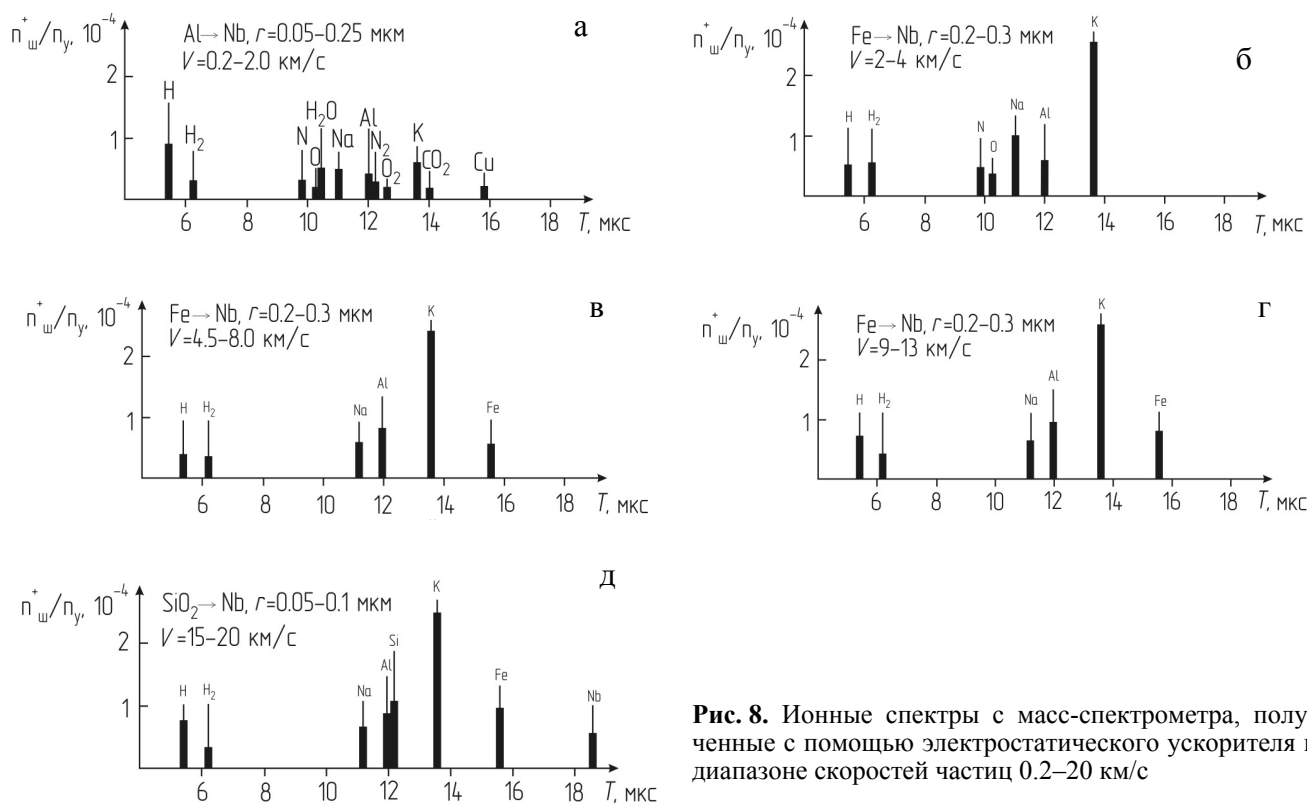
**Рис. 7.** Внешний вид газопылевого масс-спектрометра

Регистрация ионных спектров проводилась с помощью запоминающего осциллографа. Параллельно спектры записывались в память блока обработки. Информацию о скорости частиц и их зарядах получали с помощью кольцевых индукционных датчиков. За начало процесса развертки ионного спектра принимался фронт импульса электронов с мишени 1 (рис. 4).

На рис. 8 представлены ионные спектры, полученные ударом частиц из Fe и SiO<sub>2</sub> в ниобиевую мишень. Диапазон скоростей частиц находился в пределах 0.2–20 км/с.

На рис. 8, а, в спектре наблюдаются ионы, присутствующие в остаточном газе вакуумной камеры (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>), а также в материале мишени (Nb) Zr<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>. Наличие ионов в диапазоне скоростей частиц 0.2–2 км/с обусловлено электрическим разрядом, возникающим между заряженной частицей и мишенью при малом расстоянии между ними. При снятии заряда частицы электронным пучком при ее скорости 0.2–2 км/с ионы в спектре не наблюдаются. Таким образом, при низких скоростях частиц действует потенциальный механизм образования ионов.

Согласно принципу ускорения электростатическим способом, большей скорости частицы соответствует ее меньший размер и меньший заряд, поэтому при  $V = 2-4$  км/с в момент разряда частицы за меньший промежуток времени на мишень образуются меньше ионов, что видно на рис. 8, б.



**Рис. 8.** Ионные спектры с масс-спектрометра, полученные с помощью электростатического ускорителя в диапазоне скоростей частиц 0.2–20 км/с

Ударный механизм взаимодействия является определяющим при скоростях частиц более 6 км/с (рис. 8, в, г, д). При увеличении скорости частицы до 8 км/с в спектре ионов появляется  $\text{Fe}^+$ .

Другой важной характеристикой пылеударного масс-спектрометра является зависимость спектров ионов от места соударения частицы с мишенью. Для уменьшения этой зависимости в мишени равномерно по ее площади выполнены отверстия  $\varnothing 3$  мм. Отверстия в мишени имеют форму конуса для увеличения пропускной способности ионов. Параболический отражатель 3 (рис. 4) практически независимо от места соударения фокусирует ионы на приемник 4. Качество фокусировки (сбора ионов) зависит от точности изготовления отражателя. Все металлические детали масс-спектрометра выполнены из нержавеющей стали, а отражатель — из ниобия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение параболического отражателя в масс-рефлектроне позволяет значительно уменьшить зависимость масс-спектров от места соударения частицы и мишени. Для достижения

этого результата, однако, требуется диафрагмирование приемника, вызывающее некоторое падение коэффициента сбора ионов.

Достоинствами конструкции являются:

- малые габариты;
- малые вытягивающие напряжения;
- малое энергопотребление.

Проверка конструкции была проведена с помощью электродинамического усилителя и генератора Ван де Граафа. Прибор показал работоспособность в широком диапазоне скоростей частиц, а также соответствие результатов численного моделирования параметрам конструкции, полученным экспериментально.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balsiger H., Altwegg K., Bochslerrosina P. Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis // Space Science Reviews. 2007. N 128. P. 745–801.
2. Austin D.E., Ahrens T.J., Beauchamp J.L. Dustbuster: a compact impact-ionization time-of-flight mass spectrometer for in situ analysis of cosmic dust // Review of scientific instruments. 2002. V. 73, N 1. P. 185–189.
3. Auer S., Grün E., Srama R., Kempf S., Auer, R. The charge and velocity detector of the cosmic dust analyzer on Cassini // Planetary and Space Science. 2002.

- V. 50, N 7-8. P. 773–779.
4. *Goldsworthy B.J., Burchell M.J., Cole M.J., et al.* Time of flight mass spectra of ions in plasmas produced by hypervelocity impacts of organic and mineralogical microparticles on a cosmic dust analyser // *Astronomy and Astrophysics*. 2003. V 409, N 3. P. 1151–1167.
  5. *Ahrens T.J., Gupta S.C., Jyoti G.* Mass spectrometer calibration of cosmic dust analyzer // *Journal of geophysical research*. 2003. V. 108. P. 1–10.
  6. *Анучина Н.Н., Волков В.И., Евланов Е.Н. и др.* Расчетно-теоретические исследования масс-спектрометрических измерений состава пылевых частиц кометы Галлея в экспериментах "Вега" // *Физика горения и взрыва*. 2004. Т. 40, № 3. С. 77–86.
  7. *Глащенко В.П., Семкин Н.Д., Сысоев А.А. и др.* Расширение энергетического диапазона фокусируемых ионов во времяпролетном масс-спектрометре // *ЖТФ*. 1985. Т. 55, № 5. С. 904–907.
  8. *Frankel S.P.* Convergence rates of iterative treatments of partial differential equations // *Math. Tab. Washington*, 1950, April. P. 65–74.
  9. *Southwell R.V.* Relaxation methods in theoretical physics // *The University Press. Oxford*, 1946. P. 260.
  10. *Шмик Д.В., Дубенский Б.Н.* Отражатель масс-рефлектрона // *ЖТФ*. 1984. Т. 54, № 5. С. 913–916.
  11. *Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. и др.* Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 2. С. 140–147.
  12. *Новиков Л.С., Семкин Н.Д., Куликаускас В.С.* Масс-спектрометрия ионов, эмиттируемых при соударении микрометеорных частиц с материалами // *Физика и химия обработки материалов*. 1989. № 6. С. 49–57.

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (Национальный исследовательский университет), г. Самара*

Контакты: *Родин Дмитрий Владимирович*,  
Rodin.ssau@gmail.com

Материал поступил в редакцию 29.02.2012.

## SPACEBORNE (INFLIGHT) DUST IMPACT MASS SPECTROMETER FOR INVESTIGATION OF MICROMETEOROIDS ELEMENTAL COMPOSITION

**N. D. Semkin, D. V. Rodin, I. V. Piyakov, R. A. Pomelnikov**

*Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University), Samara*

The paper presents two possible designs of dust impact mass spectrometer designed to meet the requirements of target size increasing with maintaining the design characteristics at the required level. The problems of modeling the device through the use of numerical electrostatic field in the path of the mass spectrometer calculation, as well as calculations of the trajectories of charged particles are described. For each of the structures the results of modeling the dependency characteristics of the device, such as resolution and collection rate, the place of collision of particles and the target are shown. As results of this modeling the optimal size of the spherical corrector and detector aperture are derived. The description of the experimental stand for dust impact mass spectrometers testing, as well as verifying characteristics obtained from simulation are given.

*Keywords:* dust impact mass spectrometer, time of flight mass spectrometer, mass analyzer, mass-reflectron, linear ion mirror, parabolic reflector, micrometeorite, micrometeoroid