

# ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

В. Т. Коган, Б. В. Кошевенко, А. К. Павлов, А. В. Карпов

## Введение

Изучение плазменных потоков в космическом пространстве связано с необходимостью проведения автономного анализа составляющих их частиц в широком динамическом диапазоне. Требования к динамическому диапазону могут быть обусловлены разными причинами: во-первых, существенным изменением интенсивности исследуемых потоков во времени,

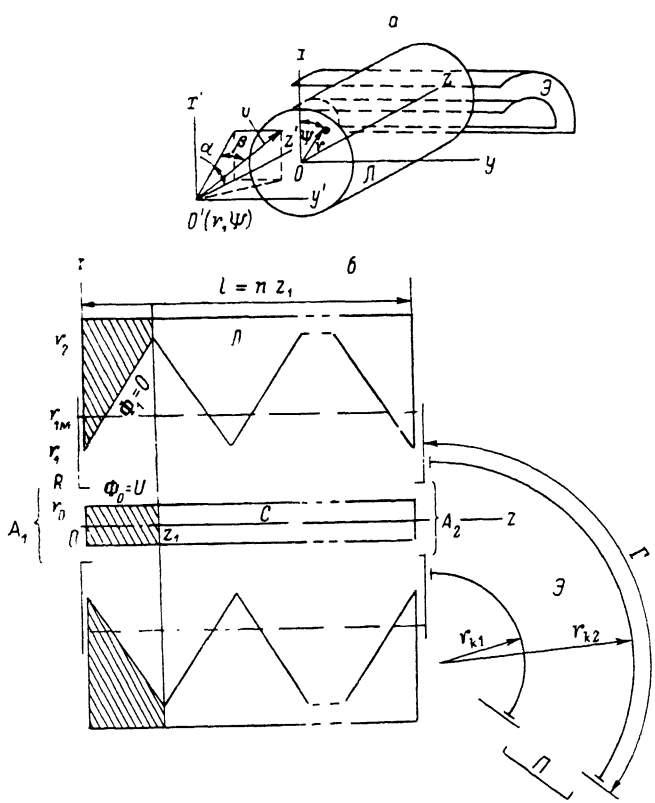


Рис. 1. Ионно-оптическая схема электростатического фильтра и энергоанализатора.  
 а — изометрия, б — проекция на плоскость  $xz$ .

в пространстве координат или в пространстве скоростей, во-вторых, необходимо изучать спектры элементов низкой и высокой распространенности одновременно [1-3].

Ограниченность динамического диапазона анализаторов связано с возможностями датчиков, применяемых для этой цели. Они не обеспечивают линейной зависимости сигнала на выходе анализатора от величины потока на его входе, в необходимом интервале значений интенсивностей исследуемого потока.

## Электростатический фильтр для ослабления потока ионов

Один из способов расширения динамического диапазона — применение фильтра, ослабляющего поток заряженных частиц до попадания его в анализатор. Ослабление достигается воздействием электростатического поля на частицы в выбранном интервале энергий. Этот способ становится эффективным, если для рассеивающего потенциала  $U$ , подаваемого в фильтр, и энергии частиц  $E$  выполняется соотношение  $U \ll E/Q$ , где  $Q$  — заряд иона.

На рис. 1 представлена схема фильтра, предназначенного для проведения исследования потоков космической плазмы в автономном режиме. Возможности предложенной схемы реализуются лишь при совместном ее использовании с энергоанализатором, например электростатическим цилиндрическим конденсатором Э (рис. 1). Величина потенциала на стержне С фильтра выбирается в зависимости от энергии частиц, на пропускание которых настроен энергоанализатор, и от требуемого ослабления потока. Профиль фильтра Л выбран такой формы, чтобы исключить попадание частиц, рассеянных на его стенках, в выходное окно А<sub>2</sub>. Электрическое поле фильтра определяется в предположении большого количества повторяющихся звеньев  $n \geq 10$ . В этом случае в пределах одного звена уравнение Лапласа для потенциала можно свести к эллиптическому уравнению с соответствующими граничными условиями и произвести расчет поля численным методом.

Уравнение Лапласа в цилиндрической системе координат с учетом симметрии потенциала — относительно координаты  $\Psi$  сводится к уравнению

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z^2} = 0, \quad (1)$$

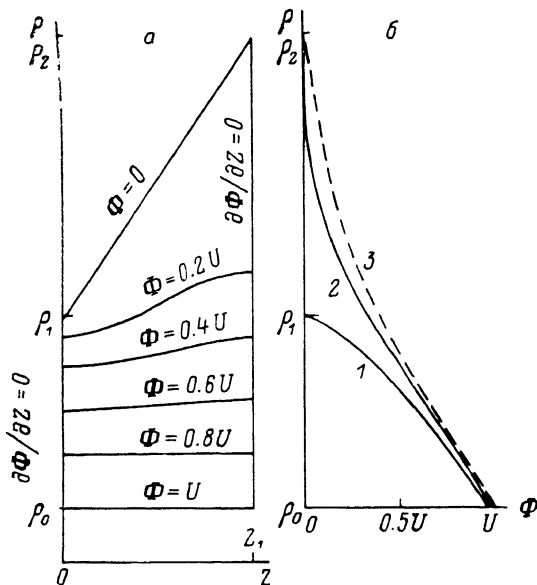
где  $\rho = r/r_1$ ,  $Z = z/r_1$ .

Граничные условия (рис. 2)

$$\Phi(\rho = \rho_0) = \Phi_0 (= U), \quad \Phi(\rho = \rho_1 + Z \cdot K) = \Phi_1 (= 0),$$

Рис. 2. Распределение потенциала в фильтре.

а — внутри звена, б — на границах звена  $Z=0$  (1),  $Z=Z_1$  (2) и в цилиндрическом конденсаторе с радиусами обкладок  $\rho_0$  и  $\rho_2$  (3).



$$\frac{\partial \Phi}{\partial Z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \Big|_{z=z_1} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho_0 = r_0/r_1$ ,  $z_1 = z_1/r_1$ ,  $\rho_1 = 1$ ,  $\rho_2 = r_2/r_1$ ,  $k = (\rho_2 - \rho_1) (1/z_1)$ .

Решение уравнения (1) с граничными условиями (2) в области  $\rho \in [\rho_0, \rho_1 + Z \cdot K]$ ,  $Z \in [0, Z_1]$  было получено численным методом. Результаты расчета потенциала внутри каждого звена и на его границах представлены на рис. 2. Здесь же представлено поле фильтра с параметрами, соответствующими сечению  $z = z_1$ , и цилиндрическим профилем. Видно, что характер поля около стержня близок к цилиндрическому. В дальнейшем при расчете функции пропускания с целью упрощения использовалась модель поля электростатического цилиндрического конденсатора. Сопоставление карты поля цилиндрического и реального фильтров позволило определить условия корректной замены одной модели поля другой, т. е. определить ограничение на размер окон А<sub>1</sub> и А<sub>2</sub>:  $R = r_1/2$ , а также найти параметры модельного цилиндрического конденсатора

$$\rho_{0M} = \rho_0, \quad \rho_{1M} = \rho_1 \left( \frac{\rho_1}{Z_1 + \rho_1} \right) + \rho_2 \left( \frac{Z_1}{Z_1 + \rho_1} \right), \quad \text{для } 1 \leq \frac{\rho_1}{Z_1} \leq 5.$$

### Свойства фильтра

Траектории частиц в поле реального фильтра определялись лишь в отдельных контрольных точках и сопоставлялись с траекториями в поле модельного цилиндрического конденсатора.

В поле реального фильтра траектории частиц определялись путем численного интегрирования уравнений движения последовательно в каждом из его звеньев с учетом их ориентации и скачка потенциала на границах А<sub>1</sub> и А<sub>2</sub>.

Траектории движения частиц в поле модельного цилиндрического фильтра определялись путем интегрирования уравнений

$$M\dot{r} - M\dot{\varphi}^2 r^2 = - \frac{\partial \Phi}{\partial r} Q,$$

$$M\dot{\varphi}^2 \dot{\varphi} = 0,$$

$$M\dot{z} = - \frac{\partial \Phi}{\partial z} Q$$

с учетом скачка потенциала на входной и выходной границах фильтра.

Из результатов расчета траекторий движения частиц в реальном и цилиндрическом фильтрах следует хорошее согласие между их аппаратурными функциями. По данным чис-

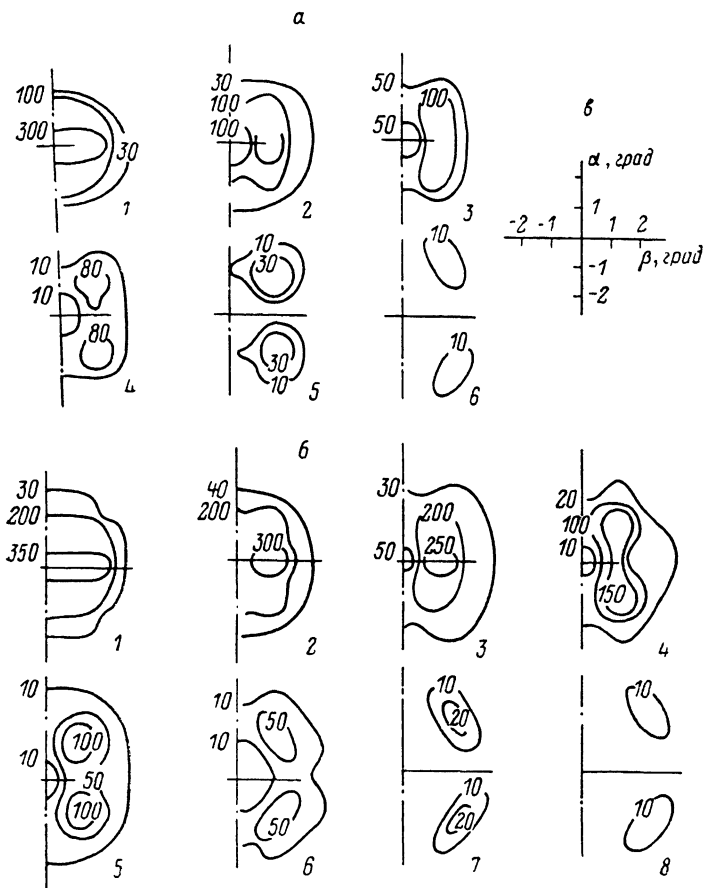


Рис. 3. Угловая функция пропускания фильтра с параметрами  $r_1=2$  мм,  $r_0=0.5$  мм,  $z_1=2$  мм,  $R=1$  мм совместно с энергоанализатором  $r_{k1}=38$  мм,  $r_{k2}=42$  мм,  $\Gamma=127^\circ$ . Линии равной интенсивности функции пропускания при различных значениях  $(QU)/E$ .

1 —  $10^{-2}$ , 2 —  $2 \cdot 10^{-2}$ , 3 —  $3 \cdot 10^{-2}$ , 4 —  $4 \cdot 10^{-2}$ , 5 —  $5 \cdot 10^{-2}$ , 6 —  $6 \cdot 10^{-2}$ , 7 —  $7 \cdot 10^{-2}$ , 8 —  $8 \cdot 10^{-2}$ ; фильтры длиной 30 (а) и 35 мм (б). Координаты и масштаб графиков в.

ленного моделирования отличие величин пропускания фильтров не превышает 5%. Таким образом, замена реального фильтра с пилообразным профилем на цилиндрический с учетом указанных выше ограничений обоснована.

### Моделирование работы фильтра

В результате численного моделирования работы фильтров совместно с электростатическим цилиндрическим конденсатором (рис. 1) получены зависимости пропускания фильтров различной длины  $l=30, 35$  мм от потенциала на рассеивающем стержне  $U$ . Эти зависимости представлены на рис. 3, а, б.

Экспериментальное моделирование осуществлялось следующим образом. На входное окно фильтра, собранного совместно с энергоанализатором в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, подавался пучок ионов, засвечивающий часть площади окна (рис. 4, а). Разброс ионов в пучке по углу  $\alpha$  составлял до  $\pm 2.5^\circ$ , а по  $\beta$  — менее  $\pm 0.5^\circ$ . Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для  $l=35$  мм представлено на рис. 4, б.

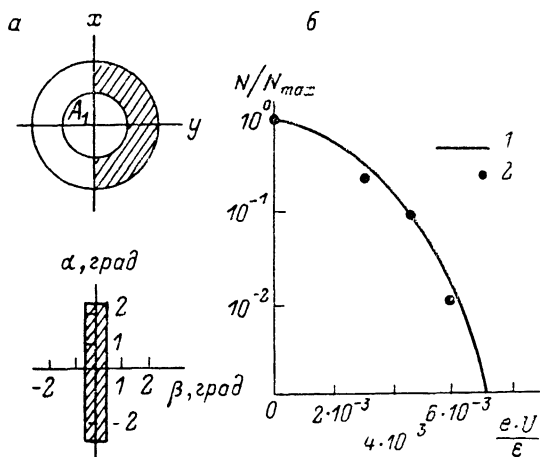


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления фильтра длиной 35 мм и энергоанализатора от рассеивающего потенциала  $U$ .

а — области засветки входного окна по поверхности и углу, б — коэффициент ослабления потока ионов в зависимости от рассеивающего потенциала; 1 — расчет, 2 — эксперимент.

### Заключение

Результаты расчета и моделирования показывают, что предложенный фильтр совместно с энергоанализатором позволяет обеспечить ослабление исходного потока заряженных частиц в 0—100 раз и более. Особенно важно, что это достигается приложением малых потенциалов к элементам фильтра  $U \ll E/Q$ .

### Список литературы

[1] Marsch E., Mühlhäuser K.-H. // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. N A1. P. 52—72.  
 [2] Marsch E., Mühlhäuser K.-H. // J. Geophys. Res. 1982. N A1. P. 35—51.  
 [3] Marsch E., Goldstein H. // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88. P. 9933—9940.

Физико-технический институт  
 им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
 Ленинград

Поступило в Редакцию  
 3 апреля 1989 г.

## ИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТОРОИДАЛЬНОГО ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА СО СЛАБОДЕФОРМИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

М. И. Явор

При конструировании энергоанализаторов секторного типа, использующихся в статических масс-спектрометрах, большое значение имеет определение допусков на их изготовление и сборку. Поэтому представляет интерес установление аналитической зависимости вариации фокусирующих и дисперсионных свойств анализаторов от типа и величины деформации электродов. Для цилиндрического конденсатора такая задача решалась в работах [1, 2]. Для тороидального дефлектора, который находит все более широкое применение в высокопрецизионных масс-спектрометрах, теория допусков развита лишь для дефектов, сохраняю-