виц А. Г., Курант Р. Теория функций. М., 1968. [9] Сухи. ТИИЭР, 1974, 62, с. 185. [10] Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц. М., 1969. [11] Маркузе Д. Оптические волноводы. М., 1974. [12] Красильников В. А., Крылов В. В. Акуст. журн., 1979, 25, с. 408. [13] Завадский В. Ю. Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах. М., 1972.

Поступила в редакцию
12.06.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 2

УДК 539.1.078

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ АППАРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Т. Б. Бондарева, В. И. Лазарев
(НИИЯФ)

Особенность работы дифференциальных спектрометров, предназначенных для исследований магнитосферной плазмы и основанных на использовании электростатического анализатора, заключается в измерении потоков частиц, имеющих изотропное распределение в пределах угла зрения прибора и сплошной энергетический спектр.

Основные характеристики электростатических анализаторов, применявшихся при космических исследованиях, рассматривались в ряде работ [1—5].

В работах [1, 2] было дано пространственное представление функции пропускания сферического и цилиндрического анализаторов по энергии и углу для узкого пучка частиц в виде «диаграммы пропуска-

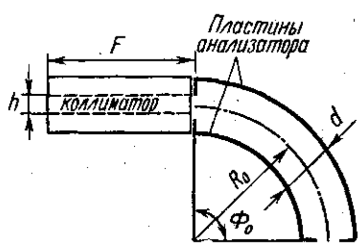

Рис. 1. Основные конструктивные элементы электростатического анализатора. Численные значения параметров: $h=1$ мм, $F=15$ мм, $R_0=80$ мм, $\Phi_0=90°$, $d=4$ мм

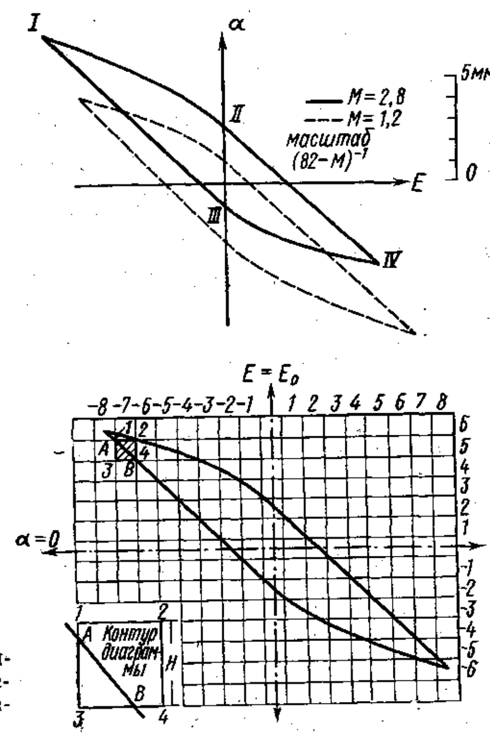

Рис. 2. Вид диаграмм пропускания анализатора для узкого пучка и схема к расчету элементов матрицы пропускания анализатора

ния» в пространстве «энергия — угол». Диаграмма пропускания является основой построения интегральной матрицы пропускания анализатора для широкого (облучающего все входное отверстие) изотропного пучка.

Цель настоящей работы состоит в изложении практического метода расчета на ЭВМ характеристик цилиндрических анализаторов, имеющих на входе щелевые диафрагмы. Этот метод был использован при расчетах аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли «Молния-1» [6] и «Метеор» [7] и может представлять интерес при необходимости проведения аналогичных расчетов. Метод основан на пространственном представлении функции пропускания и принципах построения интегральной матрицы пропускания, изложенных в [2].

Расчет проводился на примере анализатора, основные геометрические параметры которого представлены на рис. 1. Коллиматор был выполнен в виде прямоугольной щели шириной $h=1$ мм и длиной в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $L=10$ мм. Выходная диафрагма анализатора представляла собой прямоугольную прорезь в тонкой пластинке размером 10×1 мм.

Обозначим угол, под которым частица входит в анализатор в плоскости, перпендикулярной оси цилиндров, через α, а в плоскости, параллельной оси цилиндров, через β.

Пусть узкий пучок частиц (с точечным сечением) входит в анализатор на расстоянии M от внешней пластины. Геометрические границы диаграммы пропускания анализатора для такого пучка определяются по формулам (1)—(6) работы [2].

На рис. 2 приведены диаграммы пропускания открытого анализатора (без щелевого коллиматора на входе) с параметрами, указанными под рис. 1, для двух точек на входной поверхности вблизи внешней пластины ($M=1{,}2$ мм) и вблизи внутренней ($M=2{,}8$ мм) в случае, когда $\beta=0$.

Ограничение по углу α, связанное с введением щелевого коллиматора, легко определяется в аналитическом виде:

$$\alpha_{\max} \simeq \pm \frac{d-2M\pm h}{2F}. \qquad (1)$$

Представим пространство E, α в виде матрицы, полученной разбиением осей E и α на интервалы конечной длины $\Delta\alpha$ и ΔE (см. рис. 2). Назовем отношение площади произвольного элемента $\Delta\alpha_i$, ΔE_j (i — номер строки, j — номер столбца), занятой диаграммой, к общей площади элемента коэффициентом заполнения элемента K_{ijM}.

Элемент интегральной матрицы для широкого пучка, облучающего все входное отверстие при $\beta=0$, может быть получен интегрированием значения K_{ijM} произвольного элемента по входному отверстию анализатора, т. е. по M.

При этом суммируются значения K_{ijM} элемента, полученные при «движении» диаграмм пропускания между крайними значениями M_1 и M_2 с шагом ΔM с учетом ограничения по углу (формула (1)):

$$T_{ij}^{\beta=0}(\alpha_i E_j) = \Delta M \sum_{M_1}^{M_2} K_{ijM}^{\beta=0}(\alpha_i E_j M). \qquad (2)$$

Для того чтобы построить элемент матрицы пропускания анализатора для некоторого значения M с учетом возможности падения частицы под любым углом в пределах 0—β_0 (в нашем случае $\beta_0 \simeq \pm$ $\pm L/R_0\Phi_0=0{,}08$ рад), необходимо провести интегрирование этого элемента по β. Так как при падении частицы под углом β анализируется энергия $E' \cong E(1-\beta^2)$, то интегрирование сводится к суммированию значений элемента, полученных перемещением основного элемента по оси $E'(\beta)$ с выбранным шагом, причем слагаемое значение элемента по оси энергий входит в сумму с соответствующим весом.

Полученный элемент матрицы имеет вид

$$T_{ij}(\alpha_i E_j) = \sum_{\varkappa} \delta_{\varkappa}(E_j E'_{\varkappa})\, T_{ij}^{\beta=0}(\alpha_i E_{\varkappa})\, \Delta E'_{\varkappa}, \tag{3}$$

где $\delta_{\varkappa}$ — вес, с которым элемент матрицы, образованный перемещением центра основного элемента на $E'_{\varkappa}$, входит в сумму, $\Delta E'_{\varkappa}$ — шаг суммирования. Значение $\delta_{\varkappa}$ можно вычислить, если известна функция пропускания частиц, падающих на входную поверхность под различными углами β к нормали.

Функция пропускания анализатора $F'(E, E')$, у которого величины L входной и выходной диафрагм равны, дается формулами (10), (15), (15а) работы [2]. Вес можно, очевидно, определить из выражения

$$\delta_{\varkappa}(E_j, E'_{\varkappa}) = F(E_j, E'_{\varkappa}) \Big[\int\limits_{E(1-\beta_0^2)}^{E} F(E_j, E'_{\varkappa})\, dE' \Big]^{-1} \Delta E'_{\varkappa}. \tag{4}$$

Величина $\delta_{\varkappa}$ численно равна отношению площади под кривой $F(E, E')$ в интервале $\Delta E'_{\varkappa}$ к общей площади под кривой. Интервал $\Delta E'_{\varkappa}$ ограничен значениями энергий $E'(\beta_1)$ и $E'(\beta_2)$. Внутри интервала вводится переменная t, которая изменяется в пределах, скажем, от нуля до 10, такая, что $E'(\beta_t) = E'(\beta_1) + (\Delta E/10)t$; $\beta_t = \beta_2$ при $t = 10$.

Вычисляются значения $E'(\beta_t)$ и соответствующие значения $F(E'(\beta_t), E)$. Интегрирование функции $F(E'(\beta_t), E)$ в пределах $E'(\beta_1)-E'(\beta_2)$, т. е. вычисление выражения $F(E_j, E'_{\varkappa})\Delta E'_{\varkappa}$ в формуле (4), проводится по стандартной программе вычисления интеграла от таблично заданной функции [9].

При составлении алгоритма расчета на ЭВМ интегральной матрицы пропускания анализатора за основу была взята элементарная диаграмма пропускания для узкого пучка, фиксированного значения M и $\beta = 0$.

Определим, пользуясь формулами (5), (6) работы [2], полярные координаты точек I, II, III, IV элементарной диаграммы (см. рис. 2)

$$\varphi_i = \pi - 2\,\mathrm{arctg}\left[\mathrm{ctg}\,\frac{\Phi_0}{2} + \left(\frac{A}{d}\right)^{-0,5}\left(\sin\frac{\Phi_0}{2}\right)^{-1}\right] \text{ и } \varphi_i = \Phi_0$$

соответственно для $i = I, IV$ и $i = II, III$; $\rho_i = A_i(1-\cos\varphi_i)^{-1}$, где $i = I, II, III, IV$, а $A_i = M$ и $A_i = d - M$ соответственно для $i = I, II$ и $i = III, IV$.

Переходя к декартовым координатам, имеем: $X_i = \rho_i \cos\varphi'_i$; $Y_i = \rho_i \sin\varphi'_i$, где $\varphi'_i = \pi - \varphi_i$ и $\varphi'_i = -\varphi_i$ соответственно для $i = I, II$ и $i = III, IV$. Элементарная диаграмма описывается уравнениями двух кривых:

$$Y = \sqrt{A_{\mathrm{I}}^2 - 2A_{\mathrm{I}}X} \text{ и } Y = -\sqrt{A_{\mathrm{III}}^2 + 2A_{\mathrm{III}}X},$$

проходящих соответственно через точки I, II и III, IV, и двух прямых:

$$Y = \frac{Q_1}{R_1}X - \frac{W_1}{R_1} \text{ и } Y = \frac{Q_2}{R_2}X - \frac{W_2}{R_2},$$

проходящих соответственно через точки I, III и II, IV. При этом

$Q_1=Y_{III}-Y_I$, $Q_2=Y_{IV}-Y_{II}$; $R_1=X_{III}-X_I$; $R_2=X_{IV}-X_{II}$; $W_1=$ $=X_I Y_{III}-Y_I X_{III}$; $W_2=X_{II} Y_{IV}-Y_{II} X_{IV}$, X_i и Y_i $(i=I-IV)$ — координаты соответствующих характерных точек диаграммы.

Вычисления начинаются с определения границ интегральной матрицы как наибольших по модулю границ элементарных диаграмм, полученных при крайних значениях M и максимальном значении $E'(\beta)$.

Элементарная диаграмма состоит из элементов $\Delta\alpha_i$ и ΔE_j. На рис. 2 заштрихованный, частично заполненный элемент имеет вершины A, 1, 2, 4, B. Примем, что для нижней левой вершины центрального элемента $j=0$ и $i=0$, тогда координаты вершин определятся следующим образом: $X_i=(j-0{,}5)H$; $Y_i=(i-0{,}5)H$, где $i=1$, 2, 4, $X_A=(j-0{,}5)H$; Y_A находится путем совместного решения уравнения прямой, проходящей через точки I, III, и уравнения вертикальной секущей $Y=(i-0{,}5)H$. Координата X_B определяется путем совместного решения уравнения прямой, проходящей через точки I и III, и уравнения горизонтальной секущей $X=(j-0{,}5)H$. Координата $Y_B=(i-0{,}5)H$.

Аналогично определяются координаты вершин многоугольника для других элементов, но в зависимости от положения элемента в диаграмме каждый раз решается своя система уравнений.

Площадь многоугольника вычисляется по формуле [8]

$$S=\frac{1}{2}\sum_{k=2}^{n-1}[(X_1-X_{k+1})(Y_k-Y_{k+1})-(X_k-X_{k+1})(Y_1-Y_{k+1})],$$

где X_k, Y_k — координаты k-й вершины n-угольника.

Очевидно, что для элемента матрицы, целиком принадлежащего диаграмме, $K_{ijM}=1$.

Элемент интегральной матрицы для $\beta=0$ соответственно формуле (2) строится суммированием коэффициентов заполнения для каждого значения $M_1 \leqslant M \leqslant M_2$ с некоторым шагом ΔM, а интегрирование элемента по β соответственно формулам (3) и (4) производится суммированием значений элементов интегральной матрицы, соответствующих перемещению основного элемента по шкале энергий, причем каждое значение умножается на вес, с которым оно входит в сумму. Программа, реализующая разработанную схему расчета интегральной матрицы пропускания цилиндрического анализатора, была написана на языке АЛГОЛ-ГДР для ЭВМ БЭСМ-6.

Рассчитанная по этой программе матрица пропускания для анализатора с щелевой диафрагмой на входе, параметры которой были указаны выше, представлена таблицей. Элементы матрицы нормированы на 100, чтобы их можно было рассматривать как относительные пропускания.

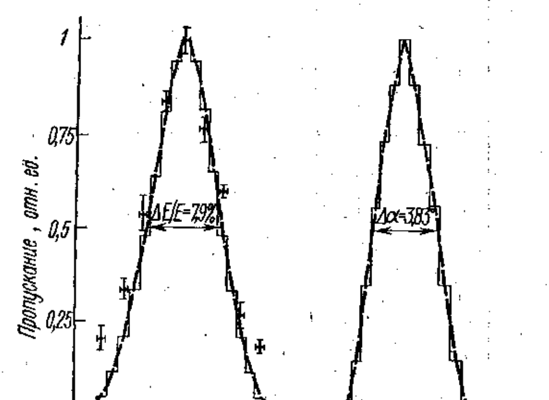

Рис. 3. Кривые пропускания по энергии и углу электростатического анализатора с щелевой диафрагмой на входе. E — фиксированная энергия электронов (1 кэВ), E_0 — энергия, соответствующая центру матрицы пропускания

Интегральная матрица пропускания электростатического анализатора с щелевой диафрагмой на входе

−1 кэВ +   →| ΔE |←

− α = 0 +   →| $\Delta\alpha$ |←

	−9	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9																				
8																				
7																				
6	3	6	2																	11
5		11	25	21	13	3														73
4			15	39	40	38	26	8												166
3				18	52	55	55	52	30	3										265
2					19	63	70	70	70	51	6									349
1						19	73	85	85	85	65	12								424
0							19	78	97	97	97	78	18							484
−1								13	67	86	86	86	73	19						430
−2									7	52	71	71	71	64	19					355
−3										3	31	54	56	56	53	17				270
−4												8	27	39	41	40	15			170
−5														3	13	21	25	11		73
−6																	2	6	3	11
−7																				
−8																				
−9																				
	3	17	42	78	124	178	243	306	356	377	356	309	245	181	126	78	42	17	3	3081

$\Delta E = 0{,}01$ кэВ

$\Delta\alpha = 0{,}01$ рад

Распределение сумм столбцов по энергии дает функцию пропускания анализатора по энергии для широкого изотропного пучка. Аналогично, суммирование элементов строк дает функцию пропускания анализатора по углу для изотропного пучка частиц с плоским спектром. На рис. 3 приведены кривые пропускания анализатора для широкого изотропного пучка электронов в области 1 кэВ, полученные из этой матрицы.

Совпадение расчетных и экспериментальных кривых пропускания по энергии проверялось с помощью электронной пушки. Входная поверхность анализатора покрывалась люминофором, и выходящий из пушки электронный пучок фокусировался до ширины входной щели анализатора. Таким образом, щель по всей ширине облучалась сходящимися потоками электронов. На выходе анализатора был установлен токовый коллектор (цилиндр Фарадея). Выходной ток анализатора измерялся электрометрическим усилителем. В нашем эксперименте исследование пропускания анализатора по энергии проводилось не при изменении энергии электронов в пучке (что соответствовало бы движению вдоль сумм столбцов матрицы), а при фиксированной энергии электронов. Это было связано с необходимостью устранить затрудняющую исследования зависимость тока в пушке от ускоряющего потенциала. Таким образом, движение вдоль элементов матрицы заменялось «движением» самой матрицы относительно фиксированного элемента, соответствующего фиксированной энергии электронов в пучке. Такое «перемещение» матрицы достигалось изменением разности потенциалов между пластинами анализатора, т. е. последовательной «настройкой» центра матрицы на различные энергии.

На рис. 3 на расчетной кривой, соответствующей пропусканию анализатором электронов с различными энергиями при настройке центра матрицы на 1 кэВ, нанесены экспериментальные значения пропускания в относительных единицах.

Максимумы кривых совмещены. Сопоставление кривых показывает, что при изготовлении и сборке анализаторов можно добиться хорошего соответствия расчетным характеристикам.

Энергометрический коэффициент анализатора (ЭГК) определяется по формуле

$$\text{ЭГК} = S \langle \Delta\alpha \Delta E \rangle \Delta\beta,$$

где

$$\langle \Delta\alpha\Delta E \rangle = N \sum_{ij} T_{ij} (\alpha_i E_j) \Delta\alpha_i \Delta E_j = \Delta\alpha\Delta E N \Sigma T_{ij} (\alpha_i E_j)$$

— сумма всех элементов матрицы, N — нормирующий множитель, S — площадь входного окна диафрагмы, $\Delta\beta$ — пропускание анализатора в плоскости углов β, определенное по ширине на половине высоты функции $F(E, E')$. В нашем случае величина ЭГК составила $2{,}03 \cdot 10^{-5}$ см^2·ср·кэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Паолини, Теодорис. Приборы для научных исследований, 1967, № 5, с. 3. [2] Теодорис, Паолини. Приборы для научных исследований, 1968, № 3, с. 38. [3] Джонсон А. Д. Приборы для научных исследований, 1972, № 7, с. 68. [4] Савин Б. И. Канд. дис. М., 1965. [5] Коваленко В. Г., Поленов Б. В.

В кн.: Ядерное приборостроение. М.: Атомиздат, 1970, вып. 12, с. 216. [6] Лазарев В. И., Марьин Б. В., Тельцов М. В., Шилов В. В. Геомагнетизм и аэрономия, 1973, 13, № 5,с. 807. [7] Бабаев А. Н., Гавриков А. Н., Лазарев В. И. и др. Тр. Гос. научно-исследоват. центра изучения природ. ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977, вып. 3, с. 27. [8] Гутер Р. С., Минаева С. С., Резниковский П. Т. Задачник-практикум по программированию и вычислительной математике. М.: Наука, 1973, с. 106. [9] Агаев М. И., Алик В. П., Марков Ю. И. Библиотека алгоритмов 51б—100б. Вып. 2. М.: Сов. радио, 1976, с. 63.

Поступила в редакцию
16.06.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 2

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Н. К. Шелковников, В. В. Тимофеев

(кафедра физики моря и вод суши)

Динамические и термические процессы в прибрежной зоне моря подвержены значительному влиянию граничных условий (рельеф дна, форма береговой черты), поэтому движение вод в этой зоне носит сложный характер, трудно поддающийся теоретическому описанию. В связи с этим большое значение имеют данные прямых измерений.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования мезомасштабных процессов в шельфовой зоне моря. Целью натурного эксперимента было проведение одновременного изучения поля скорости течения, стратификации водных масс, а также воздействия на них метеорологических факторов.

Во время многосуточной станции с борта судна, стоящего на якоре, измерялись непрерывные вертикальные профили температуры $T(z)$ и электропроводности $\varkappa(z)$, на дискретных горизонтах определялась скорость течения $V(z)$, измерялись также скорость ветра W и поток суммарной солнечной радиации Ra. Полученные данные позволили рассматривать колебания указанных характеристик в диапазоне периодов 0,66—20 ч.

Измерение распределения температуры и электропроводности проводилось методом вертикального зондирования, скорость и равномерность движения при этом контролировались датчиком давления, установленном на зонде. В качестве датчика температуры использовался полупроводниковый терморезистор МТ-54, который через соединительный кабель включался в плечо измерительного моста постоянного тока. Сигнал рассогласования, пропорциональный изменению температуры, фиксировался на самописце КСП-4. Погрешность канала измерения температуры составляла 0,03°С.

Электропроводность морской воды измерялась кондуктометрическим методом. В качестве датчика, включенного в одно из плеч моста переменного тока, использовались платиновые электроды. Сигнал с измерительной диагонали моста подавался на преобразователь, где он детектировался и усиливался. Запись производилась самописцем КСП-4. Ошибка измерения электропроводности составляла $3\cdot10^5$ Ом$^{-1}\cdot$см$^{-1}$.

Определение скорости течения проводилось на дискретных горизонтах с помощью нестандартного измерителя лопастного типа. Направление течения фиксировалось индукционным компасом.