

# Нагрузочные характеристики электростатической коаксиальной линзы

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 4 марта 1998 г.)

Приведен расчет положения изображения в зависимости от положения объекта (полого пучка) для электростатической системы в виде двух коаксиальных цилиндров и торцевой диафрагмы с кольцевой щелью.

В работе [1] нами найден режим работы коаксиальной цилиндрической линзы (КЦЛ), состоящей из двух цилиндров и плоской диафрагмы со стороны входа заряженных частиц, обеспечивающий фокусировку полого пучка на ось линзы. Численно рассчитаны кардинальные элементы пространства изображения. Для них получены простые эмпирические формулы, дающие точность не хуже 25%, удобные для инженерных расчетов [2].

Целью настоящей работы является расчет нагрузочных характеристик КЦЛ (зависимость положения изображения от положения объекта). Кроме того, авторы показывают, что для КЦЛ с фокусировкой полого пучка на ось выполняется классическая формула линзы, хорошо известная в оптике как формула Ньютона.

КЦЛ с закрытым диафрагмой передним торцом и открытым задним торцом относится к классу линз, у которых кардинальные элементы пространства объекта и изображения различаются по величине. Это связано с тем, что в пространстве объекта поле отсутствует, а в пространстве изображения оно существует и на расстоянии от линзы, большем ее апертуры, становится однородным [3]. Расчеты проводились численно по программе, разработанной авторами для электростатических электронно-оптических систем, обладающих вращательной симметрией. Геометрия КЦЛ выбрана на основании предыдущих работ авторов: соотношение между радиусами внешнего и внутреннего цилиндров  $R/\rho = 2-100$ , зазор между входной диафрагмой и внешним цилиндром  $s/R = 0.1$ , длина линзы  $l = R$ . Рабочее напряжение  $V$  подается на внешний цилиндрический электрод при заземленных внутреннем электроде и диафрагме. При таких геометрии и питании существует фокусировка полого пучка на ось линзы во всем диапазоне изменения расстояния от заднего края линзы до изображения.

На рис. 1 представлены схема КЦЛ и ее кардинальные элементы для пространства объекта в зависимости от возбуждения линзы  $\gamma = eV/\varepsilon$  ( $e$  — заряд частиц,  $\varepsilon$  — их энергия). На основании численных расчетов найдены эмпирические формулы для кардинальных элементов пространства объекта: фокусное расстояние  $f_0$ , положение главной плоскости  $h_0$ , начальный радиус  $r_i$  со стороны пространства изображения семейства центральных траекторий пучка, вокруг которых происходит

фокусировка,

$$f_0/R = 2[(1 - \rho/R)/\gamma - 0.3],$$

$$h_0/R = 0.3(\gamma - 1 + 1.1\sqrt{\rho/R}),$$

$$r_1/R = 0.2(1.5\rho/R - 1)\gamma + 0.4\sqrt{\rho/R} + 0.65. \quad (1)$$

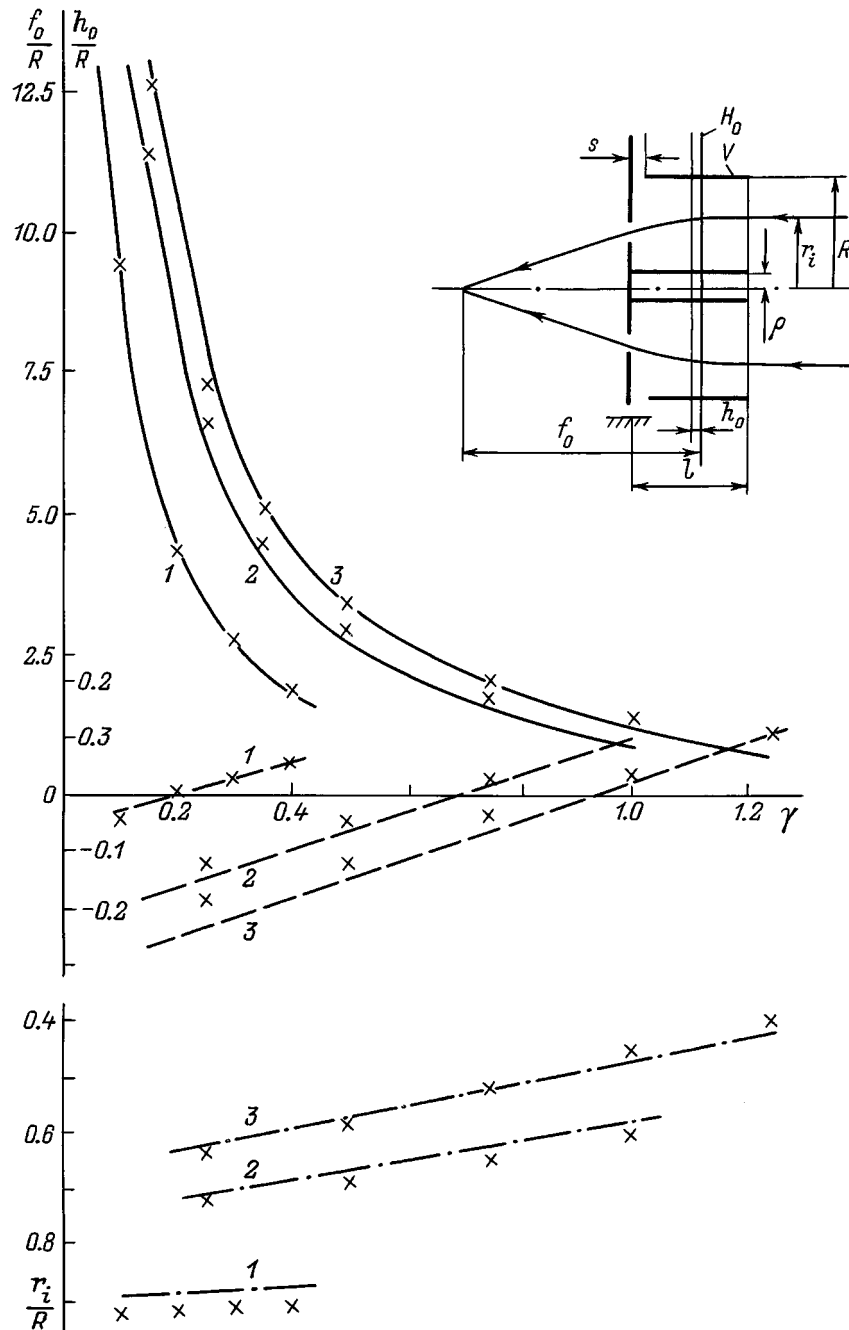
Рассчитанные по формулам (1) величины показаны крестиками на рис. 1. Видно, что отличие от численных расчетов незначительно.

Таблица 1.  $R/\rho = 2, l = R$

$\gamma$	0.1		0.2		0.3		0.4	
	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$
$\infty$	7.9	0.88	3.3	0.84	1.8	0.82	1.1	0.80
	8.0	0.89	3.2	0.86	1.7	0.83	0.90	0.80
15	20.1	0.88	5.0	0.84	2.4	0.82	1.4	0.79
	21.1	0.89	4.7	0.86	2.1	0.83	1.1	0.80
10	64.0	0.86	6.3	0.84	2.8	0.82	1.6	0.79
	83.3	0.88	5.9	0.86	2.4	0.83	1.2	0.80
5	—	—	17.5	0.83	4.8	0.82	2.3	0.78
	—	—	18.3	0.84	3.8	0.82	1.6	0.80
3	—	—	—	—	15.2	0.78	4.2	0.77
	—	—	—	—	9.2	0.81	2.5	0.78
2	—	—	—	—	—	—	13.0	0.74

Таблица 2.  $R/\rho = 100, l = R$

$\gamma$	0.25		0.5		0.75		1.0	
	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$	$g$	$r_a$
$\infty$	6.7	0.58	2.5	0.56	1.1	0.52	0.46	0.48
	5.8	0.56	2.2	0.52	0.94	0.48	0.49	0.45
15	14.3	0.58	3.5	0.56	1.4	0.51	0.59	0.48
	11.8	0.55	2.9	0.51	1.2	0.48	0.58	0.44
10	29.4	0.58	4.2	0.56	1.6	0.51	0.66	0.48
	21.7	0.54	3.4	0.51	1.3	0.47	0.62	0.43
5	—	—	8.6	0.54	2.3	0.50	0.90	0.46
	—	—	6.8	0.49	1.9	0.46	0.78	0.42
3	—	—	$\infty$	0.51	4.8	0.47	1.4	0.44
	—	—	—	0.47	3.1	0.43	1.1	0.40
2	—	—	—	—	10.7	0.44	1.9	0.42
	—	—	—	—	8.3	0.41	1.6	0.38
1	—	—	—	—	—	—	7.7	0.33
	—	—	—	—	—	—	8.6	0.31

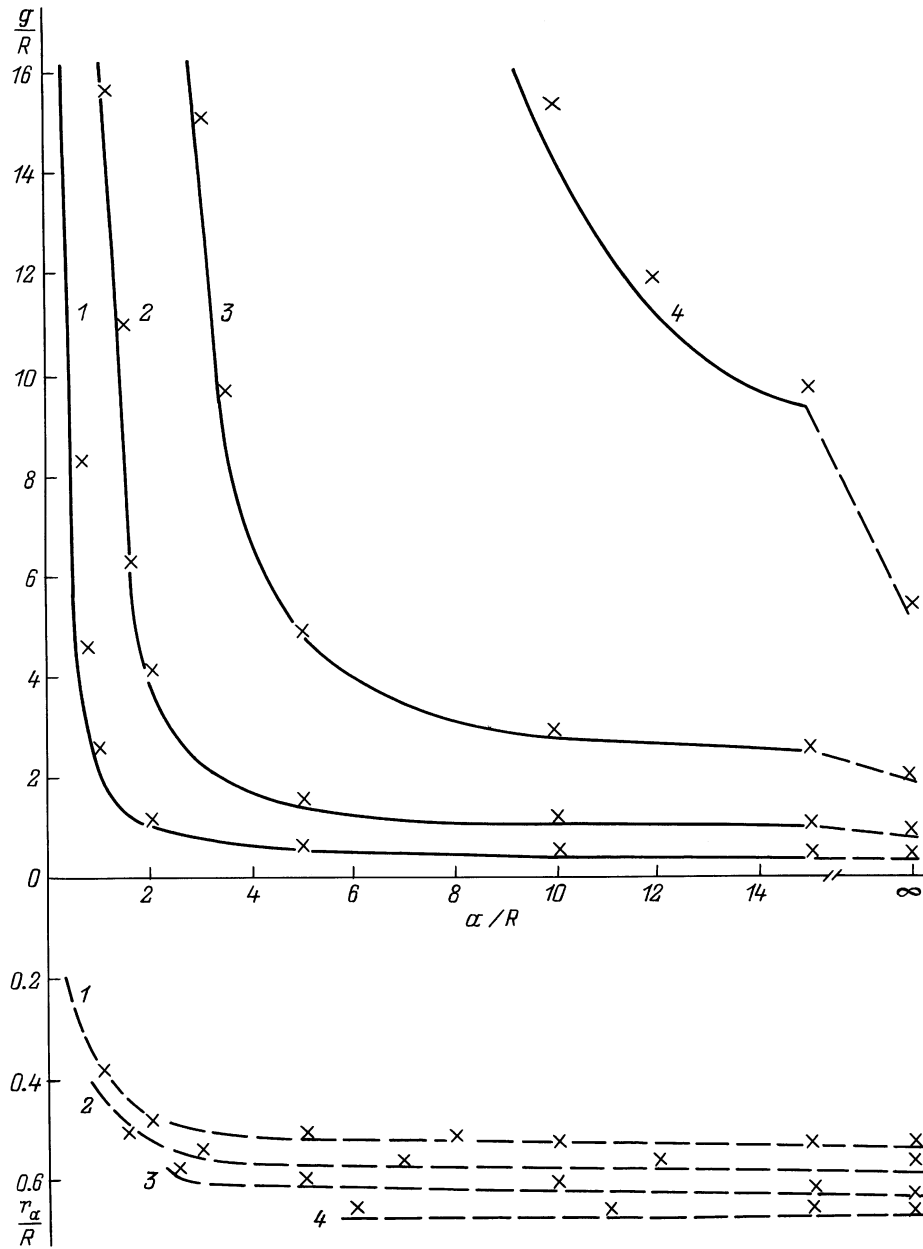


**Рис. 1.** Кардинальные элементы пространства объекта КЦЛ длины  $l = R$ : фокусное расстояние (сплошные кривые), положение главной плоскости (штриховые кривые) и радиус входа осевых траекторий пучка (штрихпунктир) при различных соотношениях радиусов внешнего и внутреннего цилиндров:  $R/\rho = 2$  (1), 10 (2), 100 (3).

Практический интерес представляет нахождение нагрузочных характеристик линзы, которые определяют связь между положением объекта и его изображения. Варьируя расстояние от объекта до входа в линзу  $a$  для определенной силы линзы, численно определялось расстояние от выхода до изображения  $g$  в режиме фокусировки ось-ось. Следует отметить, что при этом радиус центральных траекторий пучка на входе в линзу,

вокруг которых осуществляется фокусировка, зависит от положения объекта. Его величина  $r_a$  также определена нами численно. Результаты расчетов представлены в виде графиков и таблиц.

На рис. 2 даны нагрузочные характеристики КЦЛ с характерной геометрией  $R/\rho = 10$  и  $l = R$  (сплошные кривые), а также соответствующие величины радиуса  $r_i$  (штриховые кривые). В табл. 1 (верхняя строка) приве-



**Рис. 2.** Зависимость положения изображения (сплошные кривые) и радиуса центральных траекторий пучка на входе в линзу (штриховые кривые) от положения объекта при изменении возбуждения линзы, у которой  $R/\rho = 10$  и  $l = R$ :  $\gamma = 1.0$  (1), 0.75 (2), 0.5 (3), 0.25 (4).

дены нагрузочные характеристики для КЦЛ с  $R/\rho = 2$  и  $l = R$ , в табл. 2 (верхняя строка) — с  $R/\rho = 100$  и  $l = R$ . Все геометрические параметры даны в единицах радиуса внешнего цилиндра  $R$ . Следует отметить, что подстановка в классическую формулу линзы полученных численным путем величин фокусных расстояний пространств объекта и изображений дает хорошее совпадение с численными величинами, представленными на графике и в таблицах. Исключение составляют режимы работы, когда фокусное расстояние меньше апертуры линзы, при этом фокус попадает в сильное поле. В этом

случае формула Ньютона, как и для всех прочих линз, не применима.

На основе численных расчетов была получена простая эмпирическая формула для радиуса центральных траекторий пучка

$$r_a = r_0 - 0.05[3 + 1/\text{Ln}(\rho/R)]/a, \quad (2)$$

где  $r_0$  — начальный радиус центральных траекторий пучка, параллельного оси на входе в линзу ( $a \rightarrow \infty$ ), эмпирическая формула для которого найдена нами в работе [2].

Рассчитанные по формуле (2) величины  $r_a$  отмечены крестиками на рис. 2 и даны в табл. 1,2 (нижняя строка). Максимальное отличие эмпирических величин от рассчитанных численно составляет не более 10%.

Большой интерес представляет доказательство возможности использования формулы Ньютона при подстановке в нее эмпирических выражений для кардинальных элементов КЦЛ. Такие расчеты были проведены нами для указанной выше геометрии коаксиальной линзы. При этом использовалась уточненная эмпирическая формула для фокусного расстояния пространства изображения

$$f_i/R = 1.9(1 - \rho/R)/\gamma - 1.0. \quad (3)$$

Результаты расчета представлены в табл. 1,2 (нижние строки) и на рис. 2 крестиками. Видно, что в области существования действительного изображения формула Ньютона выполняется с точностью не хуже 25% (рис. 2). Точность определения положения изображения при заданном положении объекта ухудшается при приближении объекта к фокусу линзы, что связано со спецификой самой формулы Ньютона.

Таким образом, рассчитаны нагрузочные характеристики электростатической линзы, состоящей из двух коаксиальных цилиндров и расположенной вблизи них плоской входной диафрагмы в режиме фокусировки точка в точку. Расчет проведен численно на компьютере и по эмпирическим формулам. Показано, что для КЦЛ с указанной геометрией выполняется классическая формула линзы.

## Список литературы

- [1] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 16. С. 39–44.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 12. С. 81–82.
- [3] Ovsyannikova L.P., Pasovets S.V., Shpak E.V. // NIM. 1990. Vol. A 298. P. 344–348.