В дальнейшем планируется экспериментальная проверка выводов работы.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук М. И. Явору за внимание к работе и ценные замечания.

Литература

1. *Harting E., Read E. H.* Electrostatic Lenses. — Amsterdam: Elsevier, 1976.
2. *Баранова Л. А., Бубляев Р. А., Явор С. Я.*//ЖТФ. 1987. Т. 57. № 3. С. 430—433.
3. *Баранова Л. А., Бубляев Р. А., Явор С. Я.*//Там же. 1990. Т. 60. № 2. С. 159—163.

Studying focusing and space-time features of the new type 3-D electrostatic lenses

R. A. Bublyaev, G. A. Galeev
Institute for Analytical Instrumentation, RAS, St.-Petersburg, Russia

L. A. Baranova
A. F. Ioffe Physical Technical Institute, RAS, St.-Petersburg, Russia

In the present work focusing and space-time features of different 3-D single and immerse electrostatic lenses have been under study. These lenses are formed by plane-parallel electrodes with rectangular apertures with the same orientation. All the calculations were made using the licensed SIMION 3D (version 7.0) software.

УДК 539.143.2:543.51

Влияние размеров цилиндрических полюсов на параметры высокодисперсионного масс-анализатора с неоднородным магнитным полем

Л. П. Овсянникова, Т. Я. Фишкова
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Теоретически исследован статический анализатор масс с неоднородным магнитным полем, образованный полюсами цилиндрической формы при варьировании их угловых размеров. На основании полученного в аналитическом виде распределения магнитного поля для режимов с тремя поворотами траектории найдены основные параметры при условии фокусировки первого порядка в плоскости дисперсии, а также условия пространственной фокусировки. Эти параметры вычислены в широком диапазоне изменения угловых размеров полюсов, приведены их оптимальные размеры с точки зрения максимальной удельной дисперсии по массе. Проведено сравнение с масс-анализаторами с однородным полем.

В работах [1, 2] предложен статический анализатор заряженных частиц по массе в виде цилиндра из магнитного материала, разрезанный по образующим на четыре одинаковые части. При этом две из них с угловыми размерами $\Psi = 90°$ являются полюсами магнита, а остальные две — экранами, через один из которых осуществляются ввод и вывод пучка. При малой силе магнитного поля и углах впуска пучка, меньших 90°, траектории в поле имеют один поворот аналогично тому, как это происходит в масс-анализаторах с однородным полем. Поэтому в этих случаях линейная дисперсия по массе невелика. Однако в описываемом масс-анализаторе существуют режимы работы с тремя поворотами траекторий, и вследствие большой протяженности пути заряженных частиц в области неоднородного магнитного поля многократно возрастает линейная дисперсия, в результате чего может быть получено высокое разрешение по массе.

© Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я., 2004

Результаты

В настоящей работе рассчитываются основные параметры предложенного авторами масс-анализатора при изменении в широких пределах угловых размеров полюсов (Ψ = 40—150°). Его поперечное сечение схематично представлено на рис. 1, *а*. Для любой величины Ψ нами получено выражение распределения магнитного скалярного потенциала, которое имеет следующий вид:

$$\varpi(x,y) = \frac{W}{\pi}\left\{\operatorname{arctg}\frac{2\left[(x-1)\cos\frac{\Psi}{2} + y\sin\frac{\Psi}{2}\right]}{2x - x^2 - y^2} - \right.$$

$$\left. -\operatorname{arctg}\frac{2\left[(x-1)\cos\frac{\Psi}{2} - y\sin\frac{\Psi}{2}\right]}{2x - x^2 - y^2}\right\}. \qquad (1)$$

Здесь и в последующих формулах координаты, а также все линейные размеры выражены в единицах радиуса кривизны цилиндрических полюсов r, который является радиусом апертуры устройства; $\pm W$ — величина скалярного потенциала на полюсах.

В плоскости дисперсии анализатора (xoz) уравнение траектории удается один раз проинтегрировать и с использованием закона сохранения энергии получить в виде квадратур основные параметры масс-анализатора с тремя поворотами траектории. Последние имеют место при угле впуска пучка ϑ > 90°. При этом расстояние между входом (x_0 = 0) и выходом траектории из поля равно

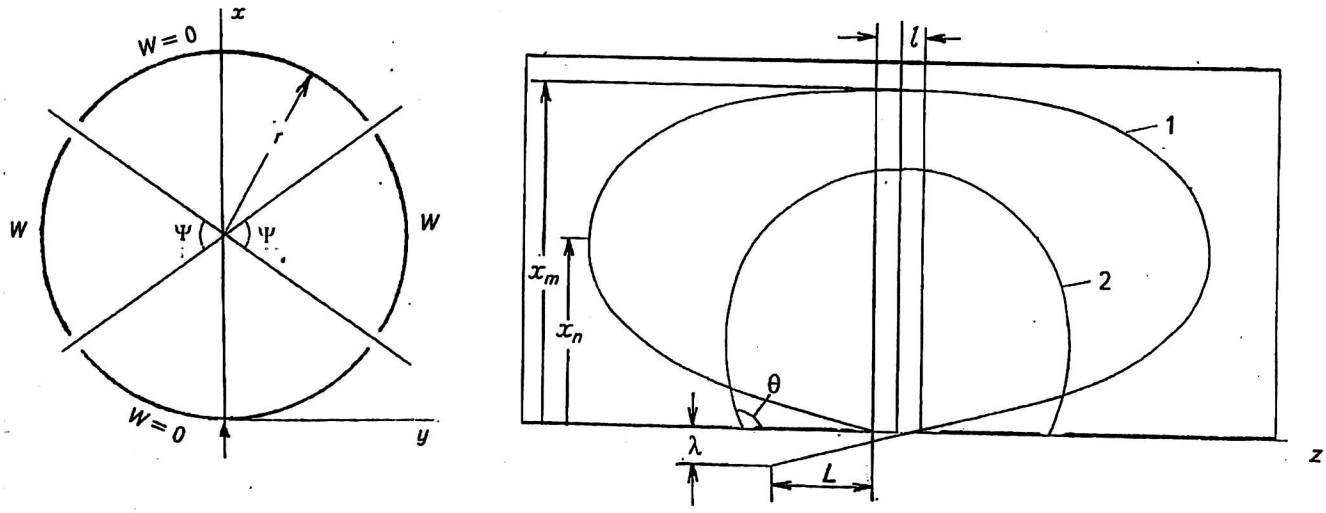
$$l = 2\int_0^{x_n}\frac{P(x)dx}{\sqrt{1-P^2(x)}} + \frac{1}{2\tau\sin(\Psi/2)}\times$$

$$\times\left[\int_{x_n}^{x_m} q(x)\sqrt{1-P^2(x)}dx + u(x_n)\right]. \qquad (2)$$

Здесь $\tau = \eta r$ — безразмерная величина силы поля $\eta = \frac{W}{\pi rc}\sqrt{-\frac{e}{2m\Phi}}$ (m и e — масса и заряд частицы, соответственно; c — скорость света; Φ — ускоряющий потенциал); x_n и x_m — координаты точек первого и второго поворотов траектории в поле, формулы которых могут быть записаны единым образом

$$x_{n,m} = \frac{\cos\frac{\Psi}{2} - \left[\sqrt{\cos^2\frac{\Psi}{2} - 2(1 - \operatorname{cth}\mu_{n,m}\sin\frac{\Psi}{2})}\right]}{1 - \operatorname{cth}\mu_{n,m}\sin\frac{\Psi}{2}},$$

где $\mu_n = -\frac{\cos\vartheta}{2\tau}, \mu_m = \frac{1-\cos\vartheta}{2\tau}$, $\vartheta = \Theta \pm \alpha$ (Θ — угол входа центральной траектории пучка, $\pm\alpha$ — его раствор).



а *б*

Рис. 1 Основные параметры масс-анализатора:
а — поперечное сечение масс-анализатора с цилиндрической формой полюсов;
б — ход центральных траекторий пучка в плоскости дисперсии:
1 — режим с высокой дисперсией; 2 — режим с пространственной фокусировкой

В формулу (2) входят также следующие полиномы:

$$P(x) = \cos\vartheta + \tau \times$$

$$\times \ln \frac{2(1-x)\cos^2(\Psi/2) + [1+\sin(\Psi/2)]x^2}{2(1-x)\cos^2(\Psi/2) + [1-\sin(\Psi/2)]x^2};$$

$$u(x) = \frac{x^2(2-x)^2 + 4(1-x)^2\cos^2(\Psi/2)}{2x(2-x)},$$

где $u(x_n)$ — величина данной функции в точке первого поворота траектории (см. рис. 1), $q(x) = \frac{du(x)}{dx}$.

При $\Psi = 90°$ формулы (1) и (2) со всеми входящими в нее параметрами переходят в соответствующие выражения работы [1].

База анализатора $L = l + \lambda \operatorname{ctg}\Theta$, где $\lambda = h + g$, а h и g — расстояния от источника и приемника частиц до границы поля, соответственно. Фокусировка первого порядка по углу раствора пучка имеет место при $\lambda = \sin^2\Theta\,[\partial l/\partial\vartheta]\,a = 0$.

Как известно, дисперсия по массе определяется ходом траекторий в области магнитного поля частиц разных масс и на выходе из него равна $\Delta l = D_m(\Delta m/m)$, где $D_m = -0{,}5\tau\frac{\partial l}{\partial\tau}$ — коэффициент линейной дисперсии. Для пучков одинаковой энергии в режимах с тремя поворотами он равен

$$D_m = -\int_0^{x_m} \frac{P(x)-\cos\vartheta}{[1-P^2(x)]^{3/2}}dx + \frac{1}{2\tau\sin(\Psi/2)} \times$$

$$\times\left\{u(x_n)\left[1-\frac{q(x_n)\cos\vartheta}{2\tau\sin(\Psi/2)}\right] + 2\int_{x_n}^{x_m}\sqrt{1-P^2(x)} \times \right. \quad (3)$$

$$\left.\times\left[q(x) + \frac{P(x)-\cos\vartheta}{4\tau\sin(\Psi/2)}\left[u(x)\frac{dq(x)}{dx} + q^2(x)\right]\right]dx\right\}.$$

Разрешающая способность масс-анализатора при очень малых размерах щелей характеризуется величиной удельной дисперсии, равной отношению коэффициента линейной дисперсии к ширине изображения, которая при наличии фокусировки первого порядка определяется старшим аберрационным членом. В рассматриваемом анализаторе, так же как во всех статических масс-анализаторах с однородным полем, старшим является коэффициент второго порядка C_2. Он найден также в виде квадратур (формула из-за громоздкости в статье не приводится). Таким образом, удельная дисперсия по массе равняется $\delta = \xi/\alpha^2$, где $\xi = D_m/C_2$ собственно и характеризует свойства магнитного поля.

Расчеты параметров в плоскости дисперсии масс-анализатора с неоднородным полем по приведенным выше формулам при различных угловых размерах полюсов позволили найти режимы с наибольшей удельной дисперсией. Параметры таких режимов приведены на рис. 2. Как и следовало ожидать, с ростом угловых размеров полюсов сила поля падает, причем в области $40° < \Psi < 80°$ она значительно более чувствительна к изменению размеров полюсов. При этом в широком диапазоне $40° \le \Psi \le 90°$ углы впуска центральных траекторий велики и меняются мало ($\theta = 160$—$167°$), так же как и ход самих траекторий, продольные и поперечные размеры которых равны (2,4—3,2) r и (1,7—1,9) r, соответственно (см. кривую 1 на рис. 1, *б*). Коэффициенты линейной дисперсии в этой области наибольшие, а удельная дисперсия в несколько раз больше единицы: при $\lambda = 0$ $3{,}5 < \xi < 4{,}0$; при $\lambda = 0{,}2\,r$ $2{,}0 < \xi < 2{,}5$ (заметим, что в однородном поле $\xi \le 4/3$). Следует отметить, что при вышеуказанных оптимальных с точки зрения получения большой удельной дисперсии размерах полюсов приемник может быть расположен как справа, так и слева от источника. В последнем случае на это обстоятельство указывает отрицательный знак величины базы анализатора (см. кривые 2 на рис. 2).

С дальнейшим ростом угла Ψ линейная дисперсия быстро уменьшается. При этом коэффициенты аберрации ведут себя неоднозначно: в зависимости от величины выноса источника и приемника из поля они либо растут (при малых $\lambda \le 0{,}1$), либо падают (при $\lambda \ge 0{,}2$). Тем не менее, удельная дисперсия падает, и ее величина становится меньше единицы.

Таким образом, перспективными с точки зрения получения высокой разрешающей способности являются масс-анализаторы, угловые размеры полюсов которых меньше 90°. Однако размеры меньше 40° неприемлемы из-за быстрого повышения силы анализатора, которое приводит к значительному увеличению числа ампервитков. Теоретически разрешающая способность может достигать величины $R = 10^6$ при вполне приемлемых габаритах устройства. Примером может служить масс-анализатор с $\Psi = 80°$ и радиусом апертуры $r = 200$ мм, если использовать пучок с расходимостью $\alpha = 10^{-3}$ рад и щели размером в 1 мкм, расположенные на границе поля ($\lambda = 0$) на расстоянии $L = 10{,}6$ мм друг от друга. При этом продольный размер траектории-петли, подобной кривой 1 на рис. 1, *б*, равен 530 мм, а поперечный — 360 мм. Сила такого анализатора $\tau = 0{,}654$, входной угол центральной траектории $\Theta = 163{,}4°$, линейная дисперсия $D_m = 3{,}8\cdot10^3$ мм, коэффициент сферической аберрации $C_2 = 9{,}7\cdot10^2$ мм. При тех же размерах щелей и угле расходимости пучка масс-анализатор с $\Psi = 60°$ и даже меньшей апертурой $r = 100$ мм (продольный размер петли 330 мм, поперечный 185 мм) также позволяет получить $R = 10^6$. В этом случае фокусировка должна быть вне пределов поля ($\lambda = 20$ мм), приемник расположен слева от источника на расстоянии 60 мм, сила поля $\tau = 0{,}906$, угол впуска $\theta = 166{,}8°$, а коэффициенты дисперсии и аберрации равны $D_m = 4{,}9\cdot10^3$ мм, $C_2 = 2{,}3\cdot10^3$ мм.

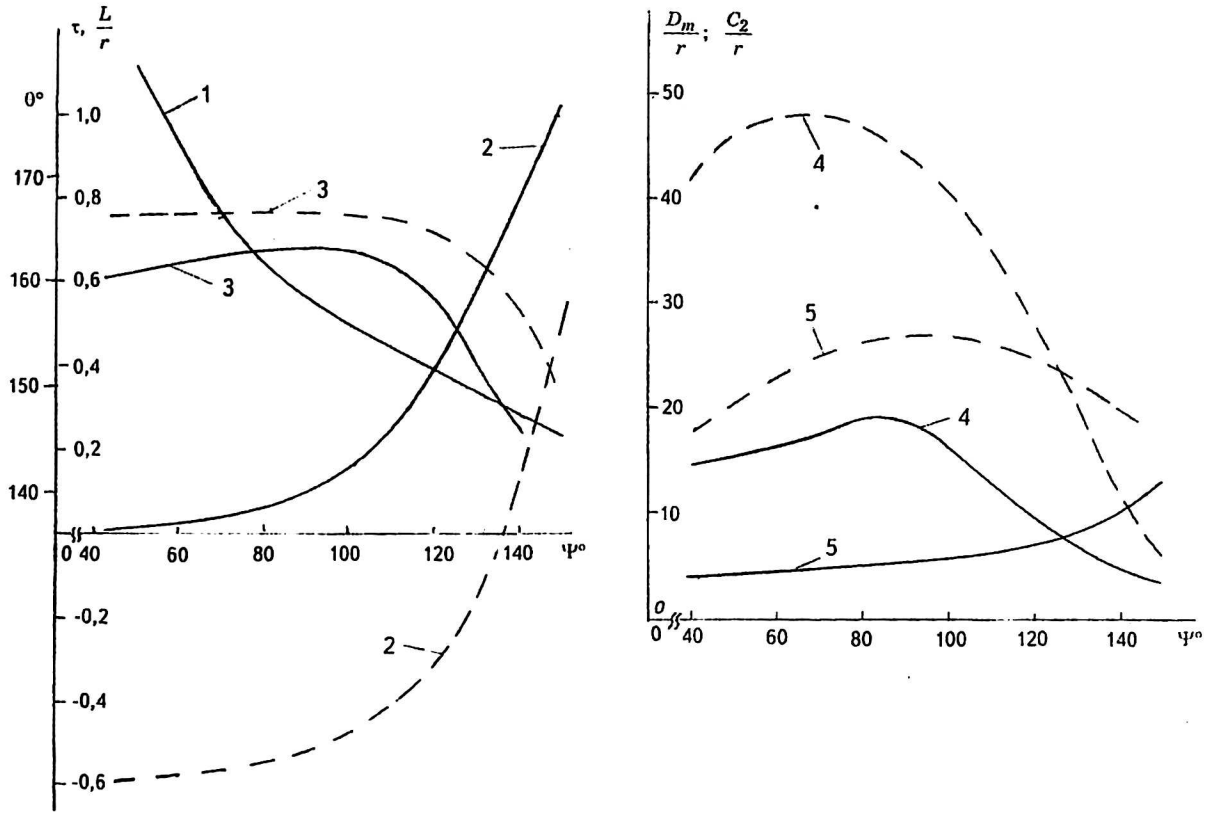


Рис. 2. Параметры в плоскости дисперсии масс-анализатора в зависимости от угловых размеров полюсов:
1 — сила поля; 2 — база анализатора; 3 — угол впуска центральной траектории пучка; 4 — коэффициент линейной дисперсии по массе; 5 — коэффициент сферической аберрации второго порядка;
——— — кривые соответствуют фокусировке на краю поля ($\lambda = 0$); ----- — $\lambda = 0{,}2\ r$

Проведено сравнение масс-анализаторов рассматриваемого и с секторными однородными полями, имеющими прямолинейные границы, когда центральная траектория пучка пересекает границы поля под прямыми углами. Эффективный угол сектора $\Omega = \varphi_1 + \varphi_2$, при условии $\sin\varphi_1 = 2\sin\varphi_2$ (φ_1 и φ_2 — углы наклона центральной траектории к горизонтальной оси на входе и выходе) величина удельной дисперсии максимальна и равна $\delta = 4/(3\alpha^2)$ [3]. Оказалось, что для получения вышеуказанной разрешающей способности при одинаковых с рассматриваемым масс-анализатором размерах щелей и углах раствора пучка необходимо иметь радиус кривизны осевой траектории, равный 2,5 м, что обусловливает значительно большие габаритные размеры устройства.

В предложенном анализаторе с неоднородным магнитным полем существует фокусировка не только в плоскости дисперсии, но и в перпендикулярном направлении, что обеспечивает увеличение светосилы устройства. Для нахождения пространственной фокусировки численно решалось уравнение движения заряженных частиц, где дифференцирование ведется по времени, так как в точках первого и третьего поворотов $x' \to \infty$. Начальные условия, а также формула расширения изображения в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, приведены в работе [1]. Результаты расчета параметров масс-анализаторов, в которых существует пространственная фокусировка первого порядка на границе поля, представлены на рис. 3. С ростом угловых размеров полюсов сила поля уменьшается (кривая 1), а углы впуска пучка заряженных частиц растут, причем в области $60° \le \Psi \le 120°$ — по линейному закону (см. кривая 3, рис. 3); возрастает также база анализатора (см. кривая 2). Наибольшая удельная дисперсия имеет место при угловых размерах полюсов $\Psi = 80$—$100°$, так как с дальнейшим ростом последних при небольшом увеличении линейной дисперсии (см. кривая 4, рис. 3) существенно возрастает сферическая аберрация (см. кривая 5, рис. 3).

Сравним данный масс-анализатор с угловым размером полюсов $\Psi = 90°$, $\Theta = 103{,}9°$, $L = 1{,}63\ r$, $D_m = 1{,}55\ r$, $C_2 = 2{,}62\ r$ (см. траекторию 2 на рис. 1, *б*) и анализатор с однородным полем и полукруговой фокусировкой [3]. При одинаковых разрешающей способности $R = 10^3$ (ширина щелей $s = 0{,}1$ мм, $\alpha = 2\cdot10^{-2}$ рад) и базе обоих анализаторов $L = 2\rho$ (ρ — радиус кривизны центральной траектории в однородном поле) в щель высотой $b = 1$ мм попадает пучок с углом раствора в вертикальной плоскости $\pm\gamma = 4{,}0\cdot10^{-2}$ рад, в то время как в однородном поле в такую щель попадет лишь $\pm\gamma_0 = 1{,}5\cdot10^{-3}$ рад., т. е. имеем 25-кратный выигрыш в светосиле. При увеличении высоты щели выигрыш несколько уменьшается, так, при $b = 2$ мм он составляет 18 раз.

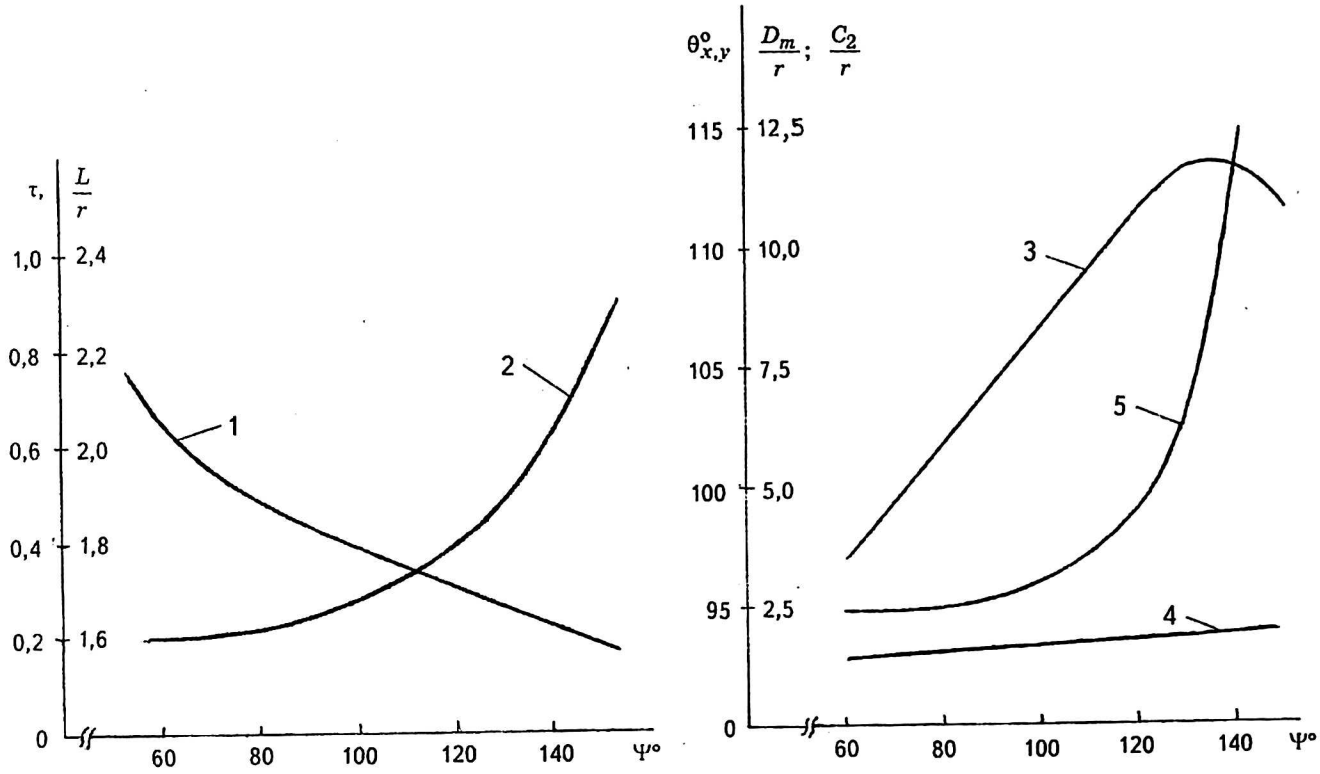


Рис. 3. Зависимости параметров масс-анализатора в режимах с пространственной фокусировкой от угловых размеров полюсов (Нумерация кривых та же, что на рис. 2)

Заключение

Проведены расчеты предложенного авторами масс-анализатора с неоднородным магнитным полем, образованного цилиндрическими полюсами с угловыми размерами, меняющимися в широких пределах. Анализ большого количества материалов показал, что такой анализатор может использоваться в режимах с тремя поворотами траекторий заряженных частиц двояким образом:

для получения высокой разрешающей способности (10^5—10^6) следует применять полюсы с угловыми размерами 60—80° при углах впуска центральных траекторий пучка в пределах 162—167°. При этом радиус апертуры устройства в 10—20 раз, а продольный и поперечный размах траекторий в 5—10 раз меньше радиуса кривизны траектории в однородном магнитном поле;

для получения на порядок более высокой светосилы по сравнению с анализаторами с однородным полем при разрешающей способности $\approx 10^3$ следует использовать полюсы с угловыми размерами 80—100° в режимах с пространственной фокусировкой при углах впуска в пределах 101—106°.

Литература

1. *Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я.*//ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 119—123.

2. *Fishkova T. Ya., Ovsyannikova L. P.*//Abstracts of Intern. Conf. CPO-6, 2002, Maryland, USA.

3. *Кельман В. М., Родникова И. В., Секунова Л. М.*// Статические масс-спектрометры. — г. Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1985. — 261 с.

Influence of cylindrical pole sizes to parameters of high-dispersion mass-analyzer with in-homogeneous field

L. P. Ovsyannikova, T. Ya. Fishkova

A. F. Ioffe Physico-Technical Institute of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

The static mass-analyzer with in-homogeneous field and the cylindrical poles proposed by authors earlier has been investigated theoretically when the angle pole sizes were varied in big diapasons. The analytical expression of the magnet scalar potential distribution has been obtained. For the regimes with three turns of the trajectories the main parameters in the dispersion plane have been found in quadrature form when the first order focusing takes place. The regimes with the space focusing have been found too. The optimal angle pole sizes have been given from point of view of the maximum specific mass dispersion The comparison with the mass-analyzers with the homogeneous field has been made.