

УДК 537.534.3

Оптимизация многолучевого масс-анализатора. Абакумова Е.В., Саченко В.Д., Тур-
тия С.Б. // Научное приборостроение. Формирование пучков заряженных частиц. Л.:
Наука, 1990. - С. 53-68.

Развивается многокритериальный подход к оптимизации магнитных анализаторов сек-
торного типа, предназначенных для многолучевых режимов измерения. Показано, что
многолучевой режим работы масс-анализатора вносит необходимость учитывать при
оптимизации специфические требования на вариацию ионно-оптических характеристик
вдоль линии фокусов. Представлены результаты четырехкритериальной оптимизации
магнитных секторных масс-анализаторов с однородным полем, показывающие эффек-
тивность многокритериального подхода к оптимизации ионно-оптических систем.
Лит. - 8 назв., ил. - 4.

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА

Магнитные секторные масс-анализаторы давно и широко применяются в масс-спектрометрии, в первую очередь, в изотопной. Непрерывно растущие требования по точности измерений изотопного состава анализируемых веществ привели к необходимости использования многолучевого метода измерений, при котором многоколлекторным детектором регистрируются одновременно несколько линий масс-спектра анализируемого вещества [1, 2]. Совершенствование многолучевого метода во многом связано с совершенствованием ионно-оптической системы (ИОС) масс-анализатора и, прежде всего, с развитием теории многолучевых магнитных масс-анализаторов. В связи с этим отметим, что за более чем полувековую историю теоретического осмысления вопросов разделения и фокусировки заряженных частиц в магнитных полях подробно исследованы многие аспекты ионно-оптической теории фокусировки и дисперсии пучков заряженных частиц. В основном исследования касались поведения пучков заряженных частиц вблизи некоторой осевой криволинейной орбиты, что и обусловило традиционный метод рассмотрения, основанный на применении степенных полипараметрических рядов по малым отклонениям координат частиц от осевой орбиты. Результатом этих исследований оказалось большое разнообразие вариантов ионно-оптических систем, нашедших широкое применение в практике масс-спектрального приборостроения [3]. Специфика многолучевого масс-анализатора состоит в том, что углы поворота ионов различных масс в магнитном поле анализатора и геометрические параметры выхода ионов из магнитного поля различны и, следовательно, различными будут ионно-оптические характеристики в точках фокусировки мономассовых пучков, где располагаются приемные щели коллекторов детектора. Эта особенность накладывает ряд специфических требований на ионно-оптическую систему многолучевого масс-анализатора, а именно, наряду со сложившимися критериями, такими как разрешающая способность, пропускание, дисперсия по массе и т.д., необходимо обеспечить стабильное значение указанных параметров вдоль линии фокусов (ЛФ), ее малую искривленность, более высокое, чем в обычных масс-анализаторах, значение коэффициента дисперсии по массе. Между тем теоретический анализ указанных факторов в литературе практически не освещен. Анализ известных решений построения многолучевых масс-анализаторов показывает, что они основаны на использовании традиционных для практики магнитных секторных масс-анализаторов представлений [1, 2]. Как показано в настоящей статье, учет специфики многолучевой ситуации и перечисленных критериев может существенно улучшить параметры масс-анализатора в многолучевом режиме.

Настоящая статья является развитием работы [4]. В ней приводятся результаты многокритериальной оптимизации многолучевых однокаскадных масс-анализаторов секторного типа с однородным магнитным полем. При этом, в отличие от работы [4] основное внимание уделено вопросам вариации ионно-оптических характеристик вдоль ЛФ. Наряду с анализом вариантов ИОС, полученных путем оптимизации, в настоящей статье для сравнения приведены результаты расчета известных масс-анализаторов. Для расчета ЛФ и ионно-оптических характеристик использованы программы, разработанные на основании формул и алгоритмов, приведенных в работе [4] и реализованных на ЭВМ IBM PC/AT.

Характерной особенностью масс-анализатора, изображенного на рис.1, который

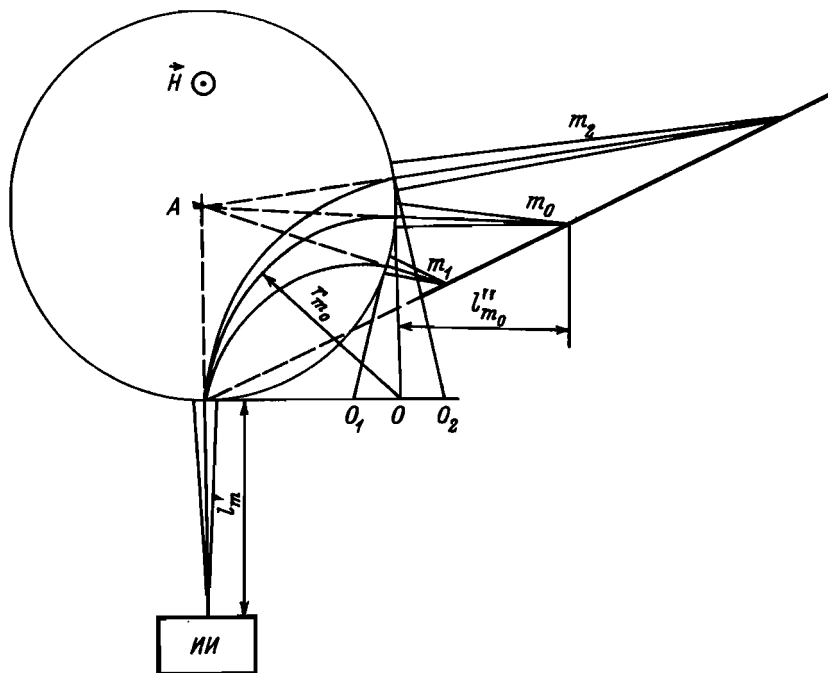


Рис.1. Масс-анализатор Бухнера. Симметричный вариант $\ell'_m = \ell''_m = r_{m_0}$ (Угол поворота главной оптической оси равен 90°)

представляет собой круг с радиусом, равным радиусу главной оптической оси, является то, что прямолинейные участки всех оптических осей лежат на прямых, проходящих через центр окружности, ограничивающей магнитное поле. Такая геометрия позволяет реализовать спектрографический режим масс-анализатора, поскольку линия фокусов в диапазоне разброса массовых чисел практически не искривлена.

Расчет показывает, что основными недостатками этого анализатора являются низкое значение коэффициента дисперсии по массе (порядка 1, что в пересчете на радиус центральной орбиты $r_{m_0} = 200$ мм составит 2 мм на процент изменения массы), а также сравнительно невысокое значение разрешающей способности, составляющей величину порядка 1500 (здесь и в дальнейшем приняты следующие характеристики начального эмиттанта: $\alpha_1 = 0,01$; $\alpha_2 = 0,003$; $S_{ист} = 0,1$ мм; $h_{ист} = 1$ мм). К недостаткам анализатора относится и отсутствие вертикальной фокусировки, что ограничивает его пропускную способность.

Ионно-оптическая система анализатора приведена на рис.2. Анализатор широко

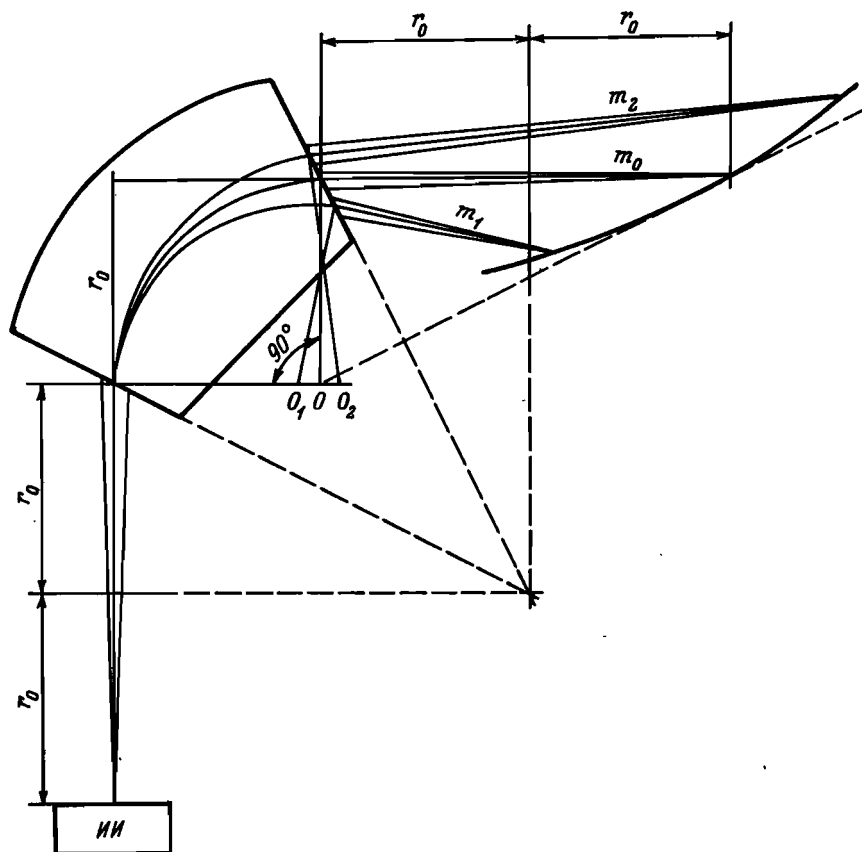


Рис.2. Масс-анализатор Кросса

используется как в отечественных (МИ-1305, МИ-1201 и др.), так и в зарубежных изотопных масс-спектрометрах [1, 2]. Основным достоинством анализатора является сравнительно высокий коэффициент дисперсии по массе, величина которого при $r_m = 200$ мм составляет 4 мм на процент изменения массы. Кроме того, анализатор обладает высокой пропускной способностью, что обеспечивается вертикальной фокусировкой, обусловленной фокусирующим действием краевых магнитных полей. Угол наклона ЛФ к главной оптической оси составляет $26,5^\circ$.

Расчет ионно-оптических характеристик вдоль ЛФ показывает, что вариации коэффициента дисперсии по массе на участке, соответствующем разбросу массовых чисел $\pm 10\%$, составляют от 3,6 до 4,3 мм на процент, а вариация разрешающей способности составляет порядка 6% от значения 2000 в главном фокусе. К недостаткам анализатора относятся сравнительно большие значения величин абберационных коэффициентов, что ограничивает возможности увеличения разрешающей способности, и малый угол наклона ЛФ. Отметим, что он равен по величине углу между нормалью к границе магнит-

ного поля и главной оптической осью. Это совпадение неслучайно. Нетрудно показать, что этим свойством обладает любой симметричный масс-анализатор со стигматичной фокусировкой.

М а с с - а н а л и з а т о р М А Т - 2 6 I [2]

Основной характерной особенностью данного масс-анализатора является несимметричность расположения источника ионов и приемника относительно магнитного поля со значительным удалением приемника от выходной границы магнитного поля. Такая геометрия анализатора создает благоприятные возможности для увеличения коэффициента дисперсии по массе за счет эффективного использования угловой дисперсии пучка, набранной в магнитном поле. Коэффициент дисперсии по массе в анализаторе при $r_{m_0} = 230$ мм составляет 6,4 мм на процент. Геометрические параметры анализатора следующие: $\varphi_{m_0} = 90^\circ$, $\ell'_{m_0} = 460$ мм, $\ell''_{m_0} = 640$ мм, $r_{m_0} = 230$ мм, $\varepsilon' = 26,565^\circ$; $\varepsilon'' = 32,645^\circ$; входная граница магнитного поля выпукла, выходная - вогнута. Поскольку данные о величинах радиусов кривизны границ полюсных наконечников в описании масс-анализатора отсутствуют, для оценки разрешающей способности R_s анализатора и угла ψ наклона ЛФ к главной оптической оси рассмотрим вариант, соответствующий максимальному значению R , что реализуется при $r_m/r' = 0,58777$, $r_m/r'' = 0,01634$. Результаты расчета показывают, что в данном варианте сферическая абберрация во всем диапазоне масс $|\frac{\Delta m}{m_0}| \leq 10\%$ практически отсутствует, а это в сочетании с большим коэффициентом дисперсии способствует достижению высокой разрешающей способности. Недостатком анализатора является значительная искривленность ЛФ, отклоняющейся от прямой более, чем на 17 мм, и малый угол ее наклона к главной оптической оси - $22,7^\circ$. Вдоль ЛФ вариация разрешающей способности составляет величину порядка 5,4 %, причем разрешающая способность в центре ЛФ составляет 3450 и уменьшается вдоль ЛФ к периферии.

П о с т а н о в к а з а д а ч и о п т и м и з а ц и и

В качестве критериев оптимизации выбраны следующие величины: разрешающая способность R_s по массам, коэффициент дисперсии по массе Δ_6 , угол ψ наклона ЛФ к главной оптической оси, максимальное отклонение δ ЛФ от прямой линии, являющейся касательной в точке пересечения ЛФ с главной оптической осью. Задача многокритериальной оптимизации ставилась в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_s &\rightarrow \max, \\ \Delta_6 &\rightarrow \max, \\ \psi &\rightarrow \max, \\ \delta &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

При этом в отличие от однокритериальной оптимизации в данной постановке результатом решения является совокупность двух множеств - множества эффективных решений в области поиска и множества Парето [7] в пространстве перечисленных критериев. Для того, чтобы в процессе оптимизации выйти на подмножество Парето, соответствующее высоким значениям коэффициента дисперсии и благоприятным величинам отношения

последнего к коэффициенту оптического увеличения, два указанных параметра введены в качестве независимых переменных. Это удалось сделать, решив уравнения, связывающие отмеченные параметры с геометрическими размерами масс-анализатора относительно последних. При этом пришлось сузить множество анализируемых вариантов ионно-оптических систем, выбрав определенное дополнительное условие, указанное ниже. Однако, как показал расчет, и при выбранном ограничении получена достаточная представительная выборка на множестве Парето, позволяющая оценить возможности многокритериальной оптимизации.

Для того, чтобы решить уравнения, определяющие Δ_6 и величину Δ_6/Δ_3 , где Δ_3 - коэффициент оптического увеличения относительно геометрических размеров анализатора, воспользуемся результатами работы [8] и представим соответствующие уравнения в виде:

$$\Delta_3 = -\frac{\cos F'(1 + \lambda' \cdot \operatorname{tg} \varepsilon'')}{\cos F''(1 + \lambda' \cdot \operatorname{tg} \varepsilon')} \cdot \Delta_6 = \frac{1}{2}(1 + \lambda'' \operatorname{tg} \varepsilon'') \left(1 + \frac{\cos F'}{\cos F''}\right), \quad (1)$$

$$F' = \arctg \frac{\lambda'}{1 + \lambda' \operatorname{tg} \varepsilon'}, \quad F'' = \arctg \frac{\lambda''}{1 + \lambda'' \operatorname{tg} \varepsilon''},$$

где λ', λ'' - относительные (в единицах r_m) входное и выходное плечи анализатора; $\varepsilon', \varepsilon''$ - углы между нормальными к входной и выходной границам магнитного поля и оптической осью (рис.3).

Условие фокусировки ионов по направлению связывает величины F' и F'' с углом поворота ионов в магнитном поле φ_m уравнением

$$\varphi_m + F' + F'' = \pi. \quad (2)$$

Будем рассматривать ионно-оптические системы, для которых выполняется условие

$$F' = F''. \quad (3)$$

Условие (3) выделяет класс систем, являющийся расширением класса симметричных ИОС. В рамках введенного условия (3) уравнения (1), (2) переписутся в виде

$$\Delta_3 = \frac{1 + \lambda'' \operatorname{tg} \varepsilon''}{1 + \lambda' \operatorname{tg} \varepsilon'}; \quad \Delta_6 = 1 + \lambda'' \operatorname{tg} \varepsilon'', \quad (4)$$

$$F' = F'' = \pi/2 - \varphi_m/2. \quad (5)$$

Для удобства обозначим

$$a = \Delta_6 / (-\Delta_3), \quad b = \Delta_6.$$

Тогда равенства (4), (5) можно переписать в виде следующей системы уравнений:

$$1 + \lambda' \operatorname{tg} \varepsilon' = a$$

$$1 + \lambda'' \operatorname{tg} \varepsilon'' = b$$

$$1/\lambda' + \operatorname{tg} \varepsilon' = \frac{1}{\lambda''} + \operatorname{tg} \varepsilon'' = \operatorname{tg} \varphi_m/2.$$

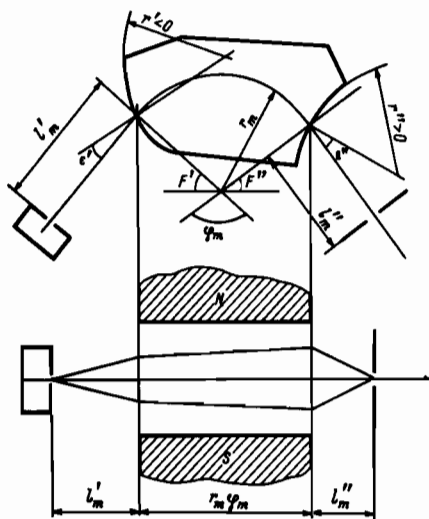


Рис.3. Геометрические параметры магнитного анализатора

Разрешая полученную систему относительно величин λ' , λ'' , ε' , ε'' , в итоге приходим к окончательному результату:

$$\begin{cases} \lambda' = a \cdot \operatorname{tg} \varphi_m/2; \lambda'' = b \cdot \operatorname{ctg} \varphi_m/2; \\ \operatorname{tg} \varepsilon' = (1 - \frac{1}{a}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_m/2; \\ \operatorname{tg} \varepsilon'' = (1 - \frac{1}{b}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_m/2. \end{cases} \quad (6)$$

Отметим ряд следствий решения (6). При $\varphi_m = \pi/2$ находим $\lambda' = a$, $\lambda'' = b$, $\operatorname{tg} \varepsilon' = 1 - 1/a$, $\operatorname{tg} \varepsilon'' = 1 - 1/b$, что при $a = b = 2$ дает $\operatorname{tg} \varepsilon' = \operatorname{tg} \varepsilon'' = 1/2$. Указанный вариант соответствует данным масс-анализатора Кросса, обладающего стигматической фокусировкой. Другим следствием системы (6) является то, что несимметричные анализаторы, параметры которых удовлетворяют равенствам (6), в области значений угла φ_m , представляющих практический интерес ($\varphi_m \leq 120^\circ$), с необходимостью астигматичны. Этот факт следует из представления коэффициента Δ_2 , являющегося критерием астигматизма, в виде

$$\Delta_2 = (2-a)(2-b) \left(\operatorname{ctg} \varphi_m/2 \cdot \left(\frac{a}{2-a} + \frac{b}{2-b} \right) + \varphi_m \right).$$

Таким образом, оптимизация многолучевого масс-анализатора проводилась в классе астигматических ИОС, удовлетворяющих условию (3), а поиск множества Парето осуществлялся одновременно по четырем перечисленным критериям в пространстве семи геометрических параметров анализатора φ_{m0} , ℓ'_m , ℓ''_{m0} , ε' , ε''_0 , r' , r'' , где r' , r'' — радиусы кривизны входной и выходной границ магнитного поля, а φ_{m0} — угол поворота главной оптической оси, и двух ионно-оптических параметров Δ_6 и Δ_6/Δ_3 . При этом две последние величины, а также величины φ_{m0} , r' , r'' варьировались независимым образом, а величины ℓ'_m , ℓ''_{m0} , ε' и ε''_0 определялись уравнениями

$$\begin{cases} \ell'_m = r_{m0} \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi_{m0}}{2} \right) \cdot a; \ell''_{m0} = r_{m0} \cdot \operatorname{ctg} \left(-\frac{\varphi_{m0}}{2} \right) \cdot b; \\ \operatorname{tg} \varepsilon' = \left(1 - \frac{1}{a} \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{m0}}{2}; \\ \operatorname{tg} \varepsilon''_0 = \left(1 - \frac{1}{b} \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{m0}}{2}. \end{cases}$$

Здесь индекс "0" означает принадлежность к главной оптической оси.

Результаты оптимизации

Оптимизация осуществлялась на ЭВМ IBM PC/AT по программе, реализующей алгоритм ветвящегося адаптивного случайного поиска [7]. В результате построена достаточно представительная выборка на множестве Парето, из которой выделены варианты ИОС с дисперсией по массе порядка 6 мм на процент изменения массы. Эти варианты сведены в табл. 1, дающую представление об альтернативности значений критериев. Последние два столбца таблицы соответствуют вариантам ММ201 (масс-анализатор Кросса) и МАТ-261 и приведены для сравнения. Во всех вариантах $\varphi_{m0} = 90^\circ$. Радиус главной осевой орбиты принят 200 мм для первых пяти вариантов и 230 мм для последнего (таким он реализован в МАТ-261). Знак кривизны границы магнитного поля положителен в случае ее вогнутости и отрицателен в случае выпуклости (см. рис. 3). В

табл.1 приведены параметры, относящиеся к главной оптической оси. Данные же, характеризующие вариации ионно-оптических параметров вдоль линии фокусов, приведены в табл.2-7, помещенных в конце статьи.

Таблица 1

Варианты многолучевых масс-анализаторов

Параметры	1	2	3	4	5	6
ℓ'_m	399,5	510,8	436,1	445,0	400,0	460,0
ℓ''_{m_0}	641,2	592,0	585,1	599,2	400,0	640,0
δ'_0	26,54	31,30	28,45	28,87	26,56	26,56
δ''_0	34,53	33,53	33,33	33,65	26,56	32,64
r_{m_0}/r'	-0,9713	0,4278	-0,8274	-0,8959	0,0	-0,5878
r_{m_0}/r''	0,7488	-0,7526	0,3038	0,4411	0,0	0,0163
D_3	1,61	1,16	1,34	1,35	1,0	1,39
D_6	3,21	2,96	2,92	2,99	2,0	2,78
D_6/D_3	2,0	2,55	2,18	2,22	2,0	2,0
D	6,41	5,92	5,85	5,99	4,0	6,4
R_5	2171	4210	3092	2875	2009	3456
δ	1,56	22,2	13,9	11,4	7,5	17,7
ψ	64,7	13,2	30,9	37,5	26,56	22,7

Во всех вариантах приняты следующие обозначения: r – безразмерная величина, равная отношению радиуса осевой орбиты, соответствующей значению массы m , к радиусу главной оптической оси $r = r_m/r_{m_0} = \sqrt{m/m_0}$; x, y – координаты ЛФ в системе координат с центром в точке главного фокуса, ось x совпадает с направлением главной оптической оси, ось y перпендикулярна ей и направлена в сторону возрастания значения r_m ; del – отклонение в направлении оси x ЛФ от прямой, являющейся касательной к ЛФ в точке пересечения ЛФ и главной оптической оси; P_{si} – угол наклона касательной к ЛФ в текущей точке ЛФ к оси x ; F_i – угол поворота оптической оси, соответствующей значению r ; $EPS2$ – угол между нормалью к выходной границе магнитного поля и оптической осью; соответствующей значению r ; L_{m2} – выходное плечо фокусировки, отсчитываемое вдоль соответствующей оптической оси; D_3, D_6 – безразмерные коэффициенты оптического увеличения и дисперсии; D – величина дисперсии по массе в мм на процент; dD – относительная вариация D , выраженная в процентах от центрального значения D ; D_{11} – коэффициент сферической aberrации, D_{22}, D_{24}, D_{44} – коэффициенты аксиальной aberrации; D_2, D_4 – коэффициенты линейного разложения высоты пучка $H = (D_2 \cdot d_2 + D_4 \cdot d_4) \cdot r_{m_0}$; R_5 – разрешающая способность; dR_5 – ее относительная вариация вдоль линии фокусов.

Из табл.2 видно, что в варианте 1 многолучевого масс-анализатора дисперсия по массе составляет в центре ЛФ 6,4 мм/%, что не уступает масс-анализатору МАТ-261, однако достигнуто при меньших габаритах анализатора. Вариация дисперсии вдоль ЛФ составляет 20 %, причем большие ее значения соответствуют более легким массам. Разрешающая способность также увеличивается в сторону легких масс и ее вариация составляет около 8 %. Максимальная разрешающая способность реализуется при $\mu = 0,95$ и составляет 2253. Отметим достаточно большой угол наклона ЛФ к главной оптической оси - 65° и пренебрежимо малую искривленность ЛФ в диапазоне значений $0,96 \leq \mu \leq 1,02$. К недостаткам варианта следует отнести высокий уровень aberrаций, в особенности аксиальных, чем обусловлено сравнительно невысокое значение разрешающей способности.

Весьма показательным в методическом отношении является вариант 2 (табл.3), обладающий наивысшей разрешающей способностью $R_s = 4210$ и наименьшим углом $\psi = 13,2^\circ$. Первый из этих показателей является несомненным достоинством, второй - существенным недостатком. Коэффициент сферической aberrации в центре ЛФ пренебрежимо мал, однако в направлении как больших, так и малых μ , коэффициент D_{11} значительно увеличивается по абсолютной величине. Коэффициенты аксиальной aberrации увеличиваются в направлении более тяжелых масс, но одновременно возрастает и коэффициент дисперсии. В целом же разрешающая способность уменьшается как в сторону легких, так и в сторону тяжелых масс, причем это уменьшение составляет 40 %. К недостаткам варианта следует отнести также значительное изменение высоты пучка и дисперсии по массе. В центральной точке ЛФ ионно-оптические показатели анализатора весьма высоки, однако в многолучевом режиме, в силу отмеченных недостатков, он уступает другим вариантам.

Примером стабильности всех ионно-оптических характеристик вдоль ЛФ является вариант 3 (табл.4). Его характеризует также достаточно высокая разрешающая способность по массам и малая величина коэффициента сферической aberrации. К недостаткам следует отнести сравнительно большую искривленность ЛФ. Вариант 4 (табл.5) обладает тем же спектром достоинств и недостатков, что и вариант 3, отличаясь от него несколько меньшей искривленностью ЛФ и большим углом ψ . Отметим, что по последнему параметру оба варианта превосходят МИ201 и МАТ-261, данные которых содержатся в табл.6, 7, соответственно. На рис.4 изображены сравнительные кривые, показывающие степень искривленности ЛФ и вариацию ионно-оптических характеристик вдоль нее. Кривые 1-6 на этих рисунках соответствуют вариантам 1-6 табл.1. Для удобства сравнения на этих же рисунках приведены кривые 7, отражающие результаты расчета ионно-оптической схемы МАТ-261. Сравнительный анализ кривых 1-6 и 7 показывает, что при одинаковых габаритах магнита масс-анализатор МАТ-261 не является оптимальным и его ионно-оптические характеристики могут быть значительно улучшены.

Таким образом, настоящая работа показывает целесообразность применения метода многокритериальной оптимизации при расчете многолучевого масс-анализатора, метода, позволяющего эффективно рассчитывать ионно-оптические системы по заданному набору критериев.

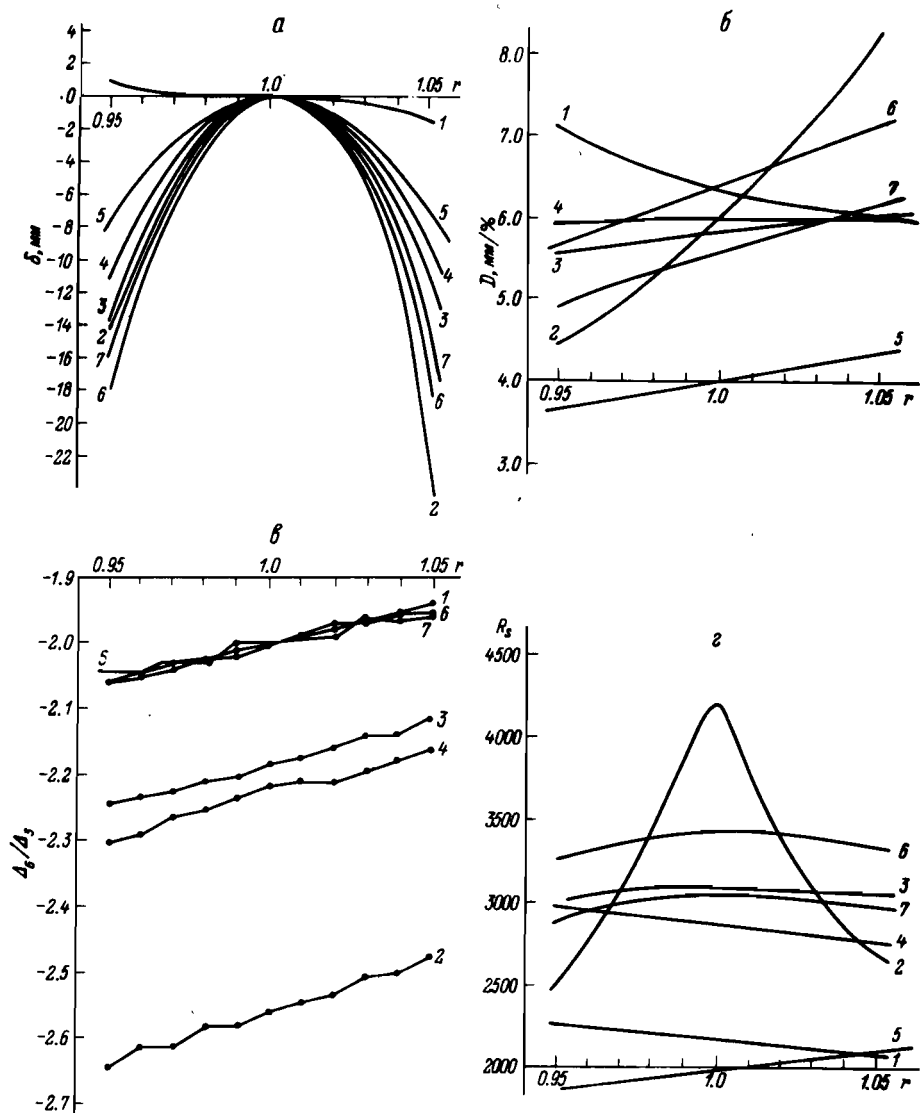


Рис.4. Кривые, показывающие степень искривленности ЛФ и вариации ионно-оптических характеристик:
а - отклонение ЛФ от прямой линии; б - вариация величины дисперсии вдоль ЛФ; в - вариация величины отношения (Δ_6/Δ_3) вдоль ЛФ;
г - вариация разрешающей способности

Вариация ионно-оптических характеристик масс-анализатора.
В а р и а н т I

Геометри- ческие и ионно-оп- тические характери- стики	Безразмерные радиусы осевых орбит, r										
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
x	-31,38	-25,19	-18,83	-12,45	-6,15	0,00	5,97	11,72	17,24	22,51	27,52
y	-67,71	-53,47	-39,64	-26,15	-12,95	0,00	12,71	25,20	37,49	49,58	61,49
del	0,64	0,11	-0,08	-0,08	-0,03	0,00	-0,05	-0,20	-0,50	-0,95	-1,56
P_{Si}	67,32	65,78	64,93	64,55	64,50	64,68	65,05	65,54	66,12	66,78	67,50
F_i	95,396	94,215	93,090	92,016	90,987	90,000	89,051	88,138	87,257	86,407	85,585
$Eps2$	42,802	40,996	39,274	37,628	36,049	34,532	33,072	31,663	30,302	28,985	27,709
$Lm2$	604,671	611,596	618,855	626,283	633,771	641,241	648,642	655,934	663,093	670,100	676,941
D_3	-1,73	-1,69	-1,67	-1,64	-1,62	-1,61	-1,59	-1,58	-1,56	-1,55	-1,54
D_6	3,56	3,47	3,39	3,32	3,26	3,21	3,16	3,11	3,07	3,03	2,99
D	7,11	6,93	6,78	6,64	6,52	6,41	6,31	6,22	6,14	6,06	5,98
dD^*	10,92	8,13	5,71	3,59	1,70	0,00	-1,55	-2,97	-4,29	-5,52	-6,67
D_{11}	-4,40	-4,41	-4,43	-4,47	-4,52	-4,57	-4,63	-4,69	-4,76	-4,83	-4,90
D_{22}	-12,88	-12,08	-11,41	-10,84	-10,35	-9,91	-9,53	-9,19	-8,89	-8,61	-8,36
D_{24}	-16,83	-15,97	-15,22	-14,55	-13,97	-13,44	-12,96	-12,52	-12,12	-11,76	-11,41
D_{44}	-4,56	-4,40	-4,26	-4,13	-4,01	-3,90	-3,80	-3,71	-3,62	-3,54	-3,46
D_2	-3,887	-3,543	-3,229	-2,938	-2,664	-2,406	-2,160	-1,925	-1,699	-1,481	-1,270
D_4	-1,917	-1,907	-1,896	-1,885	-1,874	-1,861	-1,848	-1,834	-1,818	-1,803	-1,786
H	3,291	3,080	2,886	2,705	2,536	2,734	2,220	2,072	1,929	1,790	1,655
R_5^*	2253	2240	2224	2207	2189	2171	2151	2131	2111	2091	2070
dR_5^*	3,82	3,19	2,47	1,70	0,87	0,00	-0,89	-1,81	-2,74	-3,68	-4,62

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $r=1$.

Вариация ионно-оптических характеристик масс-анализатора.
В а р и а н т 2

Геометри- ческие и ионно-оп- тические характе- ристики	Безразмерные радиусы осевых орбит, r											
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	
x	-204,00	-169,85	-132,77	-92,39	-48,30	0,00	53,09	111,68	176,65	249,03	330,16	
y	-44,48	-37,58	-29,80	-21,04	-11,15	0,00	12,60	26,85	43,03	61,44	82,49	
del	-13,97	-9,30	-5,45	-2,52	-0,66	0,00	-0,72	-3,03	-7,17	-13,44	-22,21	
ρ_{Σ}	11,20	11,64	12,05	12,44	12,82	13,18	13,51	13,88	14,13	14,41	14,67	
F_1	95,058	93,997	92,961	91,951	90,964	90,000	89,058	88,138	87,238	86,358	85,497	
F_{ps2}	35,849	35,360	34,883	34,419	33,967	33,526	33,096	32,677	32,267	31,867	31,477	
L_{m2}	382,699	417,738	455,777	497,188	542,409	591,958	646,455	706,644	773,429	847,918	931,483	
D_3	-0,84	-0,90	-0,95	-1,02	-1,08	-1,16	-1,24	-1,33	-1,43	-1,54	-1,67	
D_6	2,22	2,35	2,48	2,63	2,79	2,96	3,15	3,36	3,58	3,84	4,12	
D	4,44	4,70	4,97	5,26	5,58	5,92	6,30	6,71	7,17	7,67	8,24	
dD^*	-24,94	-20,69	-16,11	-11,17	-5,82	0,00	6,36	13,34	21,05	29,60	39,14	
D_{11}	-3,70	-3,03	-2,33	-1,58	-0,78	0,07	0,98	1,96	3,03	4,19	5,48	
D_{22}	-7,55	-7,98	-8,43	-8,92	-9,45	-10,02	-10,65	-11,33	-12,09	-12,93	-13,86	
D_{24}	-1,38	-1,50	-1,63	-1,77	-1,92	-2,08	-2,26	-2,44	-2,64	-2,87	-3,11	
D_{44}	-0,47	-0,49	-0,51	-0,53	-0,55	-0,58	-0,61	-0,64	-0,68	-0,72	-0,77	
D_2	-1,922	-2,150	-2,395	-2,660	-2,946	-3,256	-3,595	-3,965	-4,372	-4,823	-5,325	
D_4	-1,221	-1,324	-1,437	-1,560	-1,695	-1,843	-2,006	-2,185	-2,385	-2,607	-2,856	
H	1,764	1,952	1,156	2,376	2,615	2,875	3,160	3,472	3,816	4,197	4,623	
R_s	2512	2767	3062	3405	3810	4210	3745	3387	3104	2875	2686	
dR_s^*	-40,34	-34,28	-27,28	-19,12	-9,51	0,00	-11,04	-19,54	-26,27	-31,71	-36,21	

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $\mu = 1$.

Вариация ионно-оптических характеристик масс-анализатора.

В а р и а н т 3

Геометрические и ионно-оптические характеристики	Безразмерные радиусы осевых орбит, r										
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
x	-103,96	-82,12	-60,82	-40,04	-19,77	0,00	19,29	38,12	56,50	74,44	91,95
y	-53,97	-44,00	-33,58	-22,74	-11,54	0,00	11,85	23,97	36,35	48,96	61,77
del	-13,85	-8,66	-4,76	-2,07	-0,51	0,00	-0,48	-1,90	-4,19	-7,30	-11,18
β_i	23,75	25,32	26,82	28,25	29,61	30,92	32,17	33,38	34,54	35,65	36,73
F_i	95,208	94,085	93,006	91,967	90,966	90,000	89,066	88,162	87,287	86,438	85,614
ϵ_{ps2}	39,667	38,302	36,960	35,726	34,507	33,329	32,190	31,087	30,017	28,979	27,971
L_{m2}	475,828	498,540	520,795	542,619	564,037	585,070	605,737	626,056	646,045	665,717	685,087
D_3	-1,24	-1,26	-1,28	-1,30	-1,32	-1,34	-1,36	-1,38	-1,40	-1,41	-1,43
D_6	2,78	2,81	2,84	2,87	2,90	2,92	2,95	2,97	2,99	3,01	3,03
D	5,56	5,62	5,69	5,74	5,80	5,85	5,90	5,94	5,99	6,03	6,07
dD^*	-4,98	-3,85	-2,79	-1,80	-0,87	-0,00	0,82	1,60	2,34	3,03	3,69
D_{11}	0,09	0,07	0,03	-0,01	-0,05	-0,10	-0,15	-0,20	-0,26	-0,32	-0,39
D_{22}	-16,41	-16,13	-15,87	-15,63	-15,41	-15,21	-15,02	-14,85	-14,69	-14,54	-14,40
D_{24}	-13,86	-13,80	-13,74	-13,66	-13,59	-13,50	-13,42	-13,34	-13,25	-13,17	-13,08
D_{44}	-3,34	-3,36	-3,37	-3,38	-3,38	-3,38	-3,38	-3,38	-3,38	-3,38	-3,37
D_2	-2,513	-2,484	-2,446	-2,399	-2,344	-2,282	-2,213	-2,138	-2,058	-1,973	-1,882
D_4	-1,464	-1,523	-1,578	-1,629	-1,678	-2,282	-2,213	-2,138	-2,058	-1,978	-1,882
H	2,240	2,252	2,256	2,254	2,245	2,230	2,210	2,185	2,155	2,121	2,083
R_3^*	3069	3065	3092	3097	3099	3092	3076	3059	3041	3022	3001
dR_5	-0,75	-0,21	0,03	0,16	0,25	0,00	-0,49	-1,04	-1,63	-2,26	-2,29

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $r = 1$.

Вариация ионно-оптических характеристик масс-анализатора.
В а р и а н т 4

Геометри- ческие и ионно-оп- тические характери- стики	Безразмерные радиусы осевых орбит, r											
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	
x	-86,14	-67,52	-49,64	-32,44	-15,91	0,00	15,31	30,06	44,27	57,95	71,14	
y	-57,34	-46,38	-35,12	-23,62	-11,90	0,00	12,05	24,23	36,52	48,89	61,33	
del	-11,43	-7,10	-3,88	-1,68	-0,41	0,00	-0,39	-1,51	-3,31	-5,74	-8,76	
P_{si}	29,63	31,36	33,00	34,57	36,07	37,51	38,89	40,22	41,49	42,73	43,92	
F_i	95,259	94,120	93,028	91,980	90,972	90,000	89,062	88,156	87,280	86,431	85,609	
Eps_2	40,559	39,065	37,631	36,252	34,925	33,645	32,408	31,212	30,054	28,981	27,841	
Lm_2	507,790	527,252	546,082	564,325	582,021	599,205	615,908	632,157	647,978	663,392	678,420	
D_3	-1,29	-1,30	-1,32	-1,33	-1,34	-1,35	-1,36	-1,36	-1,37	-1,38	-1,39	
D_6	2,97	2,98	2,98	2,99	2,99	2,99	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
D	5,94	5,95	5,96	5,97	5,98	5,99	6,00	6,00	6,00	6,01	6,01	
dD^*	-0,88	-0,64	-0,43	-0,26	-0,12	0,00	0,09	0,17	0,22	0,25	0,27	
D_{11}	-0,41	-0,50	-0,59	-0,68	-0,77	-0,87	-0,97	-1,06	-1,16	-1,26	-1,36	
D_{22}	-17,78	-17,30	-16,87	-16,48	-16,12	-15,79	-15,48	-15,20	-14,94	-14,69	-14,46	
D_{24}	-15,86	-15,63	-15,40	-15,18	-14,96	-14,75	-14,54	-14,34	-14,15	-13,96	-13,78	
D_{44}	-3,74	-3,72	-3,70	-3,68	-3,66	-3,63	-3,61	-3,58	-3,55	-3,53	-3,50	
D_2	-3,012	-2,928	-2,838	-2,743	-2,642	-2,537	-2,427	-2,314	-2,197	-2,078	-1,955	
D_4	-1,581	-1,660	-1,675	-1,715	-1,752	-1,785	-1,815	-1,841	-1,865	-1,887	-1,905	
H	2,597	2,572	2,540	2,503	2,461	2,414	2,364	2,309	2,251	2,190	2,126	
R_s	2979	2961	2942	2920	2898	2875	2850	2825	2800	2774	2748	
dR_s^*	3,63	3,01	3,33	1,60	0,82	0,00	-0,85	-1,71	-2,60	-3,50	-4,42	

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $r = 1$.

Вариация ионно-оптической характеристики масс-анализатора
МИ-201

Геометри- ческие и ионно-оп- тические характери- стики	Безразмерные радиусы осевых орбит, r											
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	
x	-79,68	-63,81	-47,90	-31,96	-15,99	0,00	16,01	32,02	48,04	64,07	80,10	
y	-36,08	-29,51	-22,61	-15,39	-7,85	0,00	8,15	16,59	25,32	34,32	43,60	
del	-7,52	-4,79	-2,68	-1,18	-0,29	0,00	-0,29	-1,16	-2,59	-4,57	-7,09	
ρ_{si}	21,99	22,97	23,92	24,83	25,71	26,57	27,39	28,19	28,95	29,70	30,42	
R_i	94,622	93,641	92,691	91,768	90,871	90,000	89,152	88,327	87,523	86,739	85,975	
Eps_2	31,187	30,207	29,256	28,333	27,437	26,565	25,717	24,892	24,088	23,304	22,540	
Lm_2	316,034	332,661	349,372	366,165	383,041	399,998	417,038	434,161	451,368	468,659	486,037	
D_3	-0,89	-0,91	-0,93	-0,95	-0,98	-1,00	-1,02	-1,04	-1,07	-1,09	-1,11	
D_6	1,82	1,86	1,89	1,93	1,96	2,00	2,03	2,07	2,10	2,14	2,17	
D	3,64	3,71	3,78	3,86	3,93	4,00	4,07	4,14	4,21	4,27	4,34	
dD^*	-9,12	-7,23	-5,38	-3,55	-1,76	0,00	1,74	3,45	5,14	6,81	8,46	
D_{11}	-4,18	-4,14	-4,10	-4,06	-4,03	-4,00	-3,97	-3,95	-3,93	-3,91	-3,90	
D_{22}	-6,20	-6,15	-6,10	-6,06	-6,03	-6,00	-5,97	-5,95	-5,94	-5,92	-5,91	
D_{24}	-3,64	-3,64	-3,65	-3,65	-3,65	-3,64	-3,64	-3,64	-3,63	-3,63	-3,62	
D_{44}	-1,05	-1,06	-1,07	-1,07	-1,08	-1,09	-1,09	-1,10	-1,11	-1,11	-1,11	
D_2	-0,096	-0,086	-0,071	-0,052	-0,028	-0,000	0,032	0,068	0,108	0,151	0,198	
D_4	-0,833	-0,868	-0,902	-0,936	-0,968	-1,000	-1,031	-0,061	-0,091	-0,119	-0,147	
H	0,474	0,486	0,494	0,499	0,501	0,500	0,496	0,490	0,481	0,469	0,455	
R_5	1894	1921	1945	1968	1989	2009	2027	2044	2059	2073	2086	
dR_5^*	-5,70	-4,38	-3,16	-2,03	-0,98	0,00	0,90	1,73	2,49	3,19	3,83	

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $r = 1$.

Вариация ионно-оптической характеристики масс-анализатора
МАТ-261

Безразмерные радиусы осевых орбит, r											
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
x	-150,00	-120,48	-90,71	-60,70	-30,46	0,00	30,68	61,57	92,67	123,99	155,52
y	-55,41	-45,74	-35,35	-24,25	-12,46	0,00	13,13	26,92	41,36	56,44	72,15
del	-17,67	-11,25	-6,30	-2,78	-0,69	0,00	-0,69	-2,73	-6,11	-10,80	-16,79
ρ_{si}	17,58	18,70	19,77	20,80	21,78	22,72	23,62	24,48	25,31	26,10	26,86
ρ_i	95,102	94,011	92,958	91,940	90,955	90,000	89,074	88,175	87,302	86,454	85,628
$Eps2$	37,807	36,703	35,638	34,608	33,611	32,645	31,708	30,799	29,915	29,056	28,221
$Lm2$	484,003	514,547	545,415	576,612	608,142	640,014	672,234	704,812	737,756	771,076	804,784
D_3	-1,19	-1,23	-1,27	-1,31	-1,35	-1,39	-1,43	-1,47	-1,51	-1,55	-1,59
D_6	2,45	2,52	2,59	2,65	2,72	2,78	2,85	2,91	2,97	3,03	3,10
D	5,64	5,80	5,95	6,10	6,25	6,40	6,55	6,69	6,84	6,98	7,12
dD^*	-11,80	-9,38	-6,99	-4,64	-2,31	0,00	2,29	4,56	6,81	9,05	11,29
D_{11}	-0,40	-0,31	-0,22	-0,14	-0,07	0,00	0,06	0,11	0,16	0,21	0,25
D_{22}	-12,96	-12,93	-12,90	-12,88	-12,88	-12,88	-12,89	-12,91	-12,93	-12,97	-13,01
D_{24}	-9,60	-9,71	-9,81	-9,90	-9,99	-10,08	-10,16	-10,24	-10,32	-10,39	-10,47
D_{44}	-2,49	-2,54	-2,58	-2,62	-2,66	-2,70	-2,74	-2,78	-2,82	-2,85	-2,88
D_2	-1,488	-1,519	-1,542	-1,557	-1,565	-1,565	-1,559	-1,546	-1,526	-1,501	-1,469
D_4	-1,230	-1,298	-1,364	-1,430	-1,495	-1,559	-1,622	-1,684	-1,746	-1,806	-1,865
n	1,642	1,697	1,746	1,790	1,827	1,860	1,887	1,909	1,926	1,939	1,946
R_s^*	3269	3319	3364	3403	3438	3456	3444	3420	3399	3380	3362
dR_s^*	-5,42	-3,96	-2,66	-1,53	-0,53	0,00	-0,36	-1,04	-1,65	-2,21	-2,71

* Эти параметры даны в процентном отношении от соответствующей величины, вычисленной при $r = 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проспект фирмы VG Isomass.
2. Проспект фирмы Finnigan MAT.
3. Кельман В.М. и др. Статические масс-спектрометры. - Алма-Ата: Наука, 1985.
4. Абакумова Е.В. и др.//Научное приборостроение: Сб.научн.тр. - Л.: Наука, 1989. - С.45-54.
5. Browne C.P., Buechner W.W.//Rev.Sci.Instr. 1956. N 27. - P. 899.
6. Cross W.G.//Rev.Sci.Instr. 1951. - N 22. - P. 717.
7. Туртия С.Б.//Научное приборостроение: Сб.научн.тр. - Л.: Наука, 1989. - С. 116-122.
8. Саченко В.Д.//ЖТФ. - 1980. Т. 53.