

УДК 517.956.225: 621.319.7

© С. И. Шевченко

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА ТИПА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО. Ч. I

Исследовано влияние входных параметров электронных пучков на форму аппаратной функции цилиндрического энергоанализатора. Показано, что выбором углов входа электронного пучка в энергоанализатор можно значительно уменьшить "хвосты" пиков.

*Кл. сл.:* аксиальный энергоанализатор, аппаратная функция, разрешающая способность, пропускание

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно большое число статических электронных (и ионных) энергоанализаторов (ЭА) аксиального типа. Аксиальный энергоанализатор (АЭА) типа цилиндрическое зеркало (ЦЗ) нашел широкое применение в электронной спектроскопии благодаря простоте конструкции и хорошим характеристикам. ЦЗ применяется для элементного и структурного анализа (электронная спектроскопия для химического анализа и фотоэлектронная спектроскопия).

АЭА описаны в большом числе работ (см. обзоры [1, 2] и монографии [3, 4, 5]). Основные физические принципы работы АЭА типа ЦЗ развиты в [6]. Ниже будем пользоваться обозначениями работы [6].

Аппаратная функция (АФ) является одной из наиболее важных характеристик ЭА. Из нее легко получаются такие характеристики ЭА, как разрешение (или разрешающая способность) и пропускание. Под расчетной АФ будем понимать совокупность углов (угловой зазор, апертуру) входа таких электронов в диспергирующее поле, которые затем попадают на детектор. В работе [7] был описан алгоритм вычисления аппаратной функции (АФ), в результате действия которого получается АФ, весьма похожая на АФ из работ [8–10]. В данной работе, используя методику работы [7], изучалось влияние входных параметров пучка электронов на АФ аксиального энергоанализатора типа ЦЗ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Следуя [6], будем считать, что электроны, стартова с оси, двигаются прямолинейно в бесполовом пространстве до внутреннего цилиндра, проходят через расположенную на внутреннем цилиндре щель и попадают в пространство между цилиндрами, где находится тормозящее поле, в котором

они изменяют свое направление. Далее через щель, расположенную также на внутреннем цилиндре, электроны попадают в бесполовое пространство и перемещаются до оси, где находится выходная диафрагма, за которой расположен детектор. Будем считать, что обе кольцевые щели, расположенные на внутреннем цилиндре, закрыты идеальными сетками. Поэтому краевые поля, присутствующие вблизи этих щелей можно не рассматривать. Кроме того, будем считать, что имеем дело с идеальным ЦЗ (т. е. или бесконечно длинным, или на боковых срезах которого задается (устанавливается) распределение поля (потенциала) идеального ЦЗ). Как было описано в [1–4], в энергоанализаторе типа ЦЗ могут быть реализованы различные схемы прохождения электронов (ось—ось, кольцо—ось, ось—кольцо, кольцо—кольцо). Вход в диспергирующее пространство (ДП) может быть осуществлен через обкладки ЦЗ (внутренний или внешний цилиндр) или через торец (боковой срез).

При изучении АФ интересны ее зависимость от  $\Delta d$  — размера выходной диафрагмы (ВД), от положения ВД (ее смещения относительно оптимального положения) и от параметров входной диафрагмы.

В работе [11] уже рассматривалась проблема влияния входных параметров пучка электронов на светимость в ЭА. Однако именно для АЭА типа ЦЗ в этой работе были высказаны только самые общие слова, что существует "возможность увеличения светимости анализаторов ... за счет соответствующего выбора входных параметров".

В представленной работе изучалась схема ось—ось с впуском электронов в ДП через внутреннюю обкладку ЦЗ. Как следует из многочисленных работ (см. обзор [1]), в рассматриваемом случае возможны одна фокусировка первого порядка, две фокусировки первого порядка, одна фокусировка второго порядка. Кроме этого списка в данной работе дополнительно рассмотрим и слу-

чай, когда нет фокусировки, но фокусировка второго порядка находится близко. Нерадиальное (азимутальное) движение электронов в схеме ось—ось можно не рассматривать.

Расстояние от точки старта до точки пересечения электронами оси, где в рассматриваемом случае расположена ВД, равно [6]

$$Z = 2r_1 \operatorname{ctg} \theta + 2r_1 S e^{p^2} \Phi(p), \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол старта электронов, отсчитываемый от оси;  $S = \sqrt{w/ea} \cos \theta$ ;  $e$  — заряд электрона;  $w = mv_0^2/2$  — кинетическая энергия электрона до попадания в диспергирующее поле;  $a = U/\ln(r_2/r_1)$ ;  $U$  — разность потенциалов между цилиндрами ЭА;  $p = \sqrt{w/ea} \sin \theta$ ;  $\Phi(p)$  — нормальный интеграл вероятности [12]

$$\Phi(p) = \int_0^p e^{-z^2} dz = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf}(p).$$

В выражении (1) первый член описывает двукратное прохождение электронами бесполевого пространства внутри малого цилиндра, а второй член — прохождение электронами диспергирующего пространства.

В [6] получено, что при  $p = 0.77$  ( $\theta = 42^\circ 20'$ ) в анализаторе осуществляется фокусировка по  $\theta$  второго порядка. При этом условии  $Z = 6.12r_1$ . Далее в данной работе будем все расчеты проводить для ЦЗ с внутренним цилиндром 2 см, внешним цилиндром 5 см и зазором выходной диафрагмы 0.02 см (везде, где не использованы другие величины зазора ВД).

Аппаратная функция АЭА рассчитывается с помощью описанной в [7] методики. В качестве основы для всей последующей работы служит расчет траекторий. На рис. 1, а, представлены графики зависимости расстояния  $Z(\theta)$  от угла старта  $\theta$  при разных значениях энергии старта. Близкие прямые, параллельные оси абсцисс (ось углов старта), представляют крайние точки зазора выходной диафрагмы (их пары пронумерованы 1–9). На рис. 1 положение выходной диафрагмы (ВД), отмеченное цифрой 5, соответствует фокусировке второго порядка, цифрой 6 — положению ВД, при котором выполняется условие минимальной ширины пучка, а все, расположенные выше 5-го положения ВД, — двум фокусировкам первого порядка, а ниже 5-го положения ВД — отсутствию фокусировки.

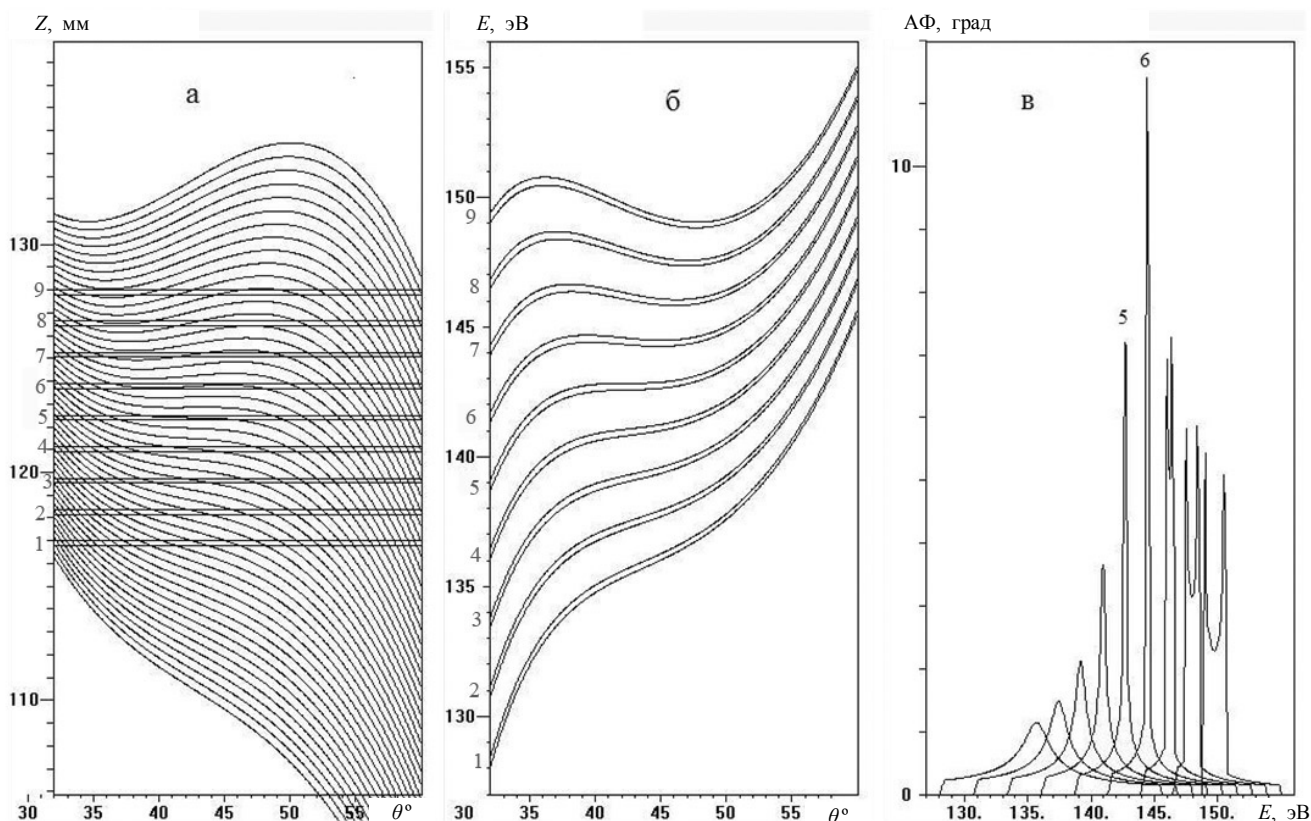


Рис. 1. Графики зависимостей:  $Z(\theta)$ , построенные при разных энергиях электронов, (а);  $E_{L,R}(\theta)$ , построенные для разных положений ВД, (б); аппаратной функции ЦЗ, построенные при разных положениях ВД, (в)

Обработка результатов расчета траекторий дает возможность получить зависимости энергии, с которой электроны стартуют и попадают в левый и правый края зазора выходной диафрагмы  $E_{L,R}(\theta)$  (см. рис. 1, б). Лежащие на этом рисунке выше кривые соответствуют более далеким положениям ВД. Из этих кривых легко получить диапазон углов старта, в котором электроны попадают в зазор выходной диафрагмы и дают вклад в ток на детекторе. Если предположить, что при старте электроны имеют изотропное распределение, то этот диапазон углов пропорционален току на коллекторе, т. е. пропорционален пропусканию. А зависимость этого тока от энергии старта представляет собой реальную аппаратную функцию. Расчетная аппаратная функция для рассматриваемого случая и для разных положений выходной диафрагмы представлена на рис. 1, в. Более удаленным от точки старта ВД соответствуют пики с большей энергией.

В литературе уже приводился вид АФ в указанном случае [8–10, 13]. Однако в этих работах не полностью приведены параметры функционирования ЭА. Поэтому количественное сравнение

провести не удалось. Что касается качественного сравнения, то оно, особенно с работой [9], получено хорошее. Правда, мелкие отличия все же присутствуют. Так, в нашей работе [7] вид пика АФ несколько более острый, несимметричный, хвост по уровню больше и на хвосте присутствуют изломы (до трех штук). Такое отличие от графиков работ [8–10] можно объяснить тем, что в этих работах на графиках АФ бралось слишком мало точек. В работе [7] точек на указанных графиках бралось на один-два порядка больше. Кроме того, проверочный алгоритм, упомянутый в [7], дает результаты, хорошо совпадающие с результатами работы основного описанного в этой работе алгоритма.

### АФ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОДНОЙ ФОКУСИРОВКИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Как видно из рис. 1, фокусировка первого порядка может наблюдаться для схемы ось—ось, только если из полного диапазона углов старта вырезается один минимум или один максимум на кривых  $E_{L,R}(\theta)$

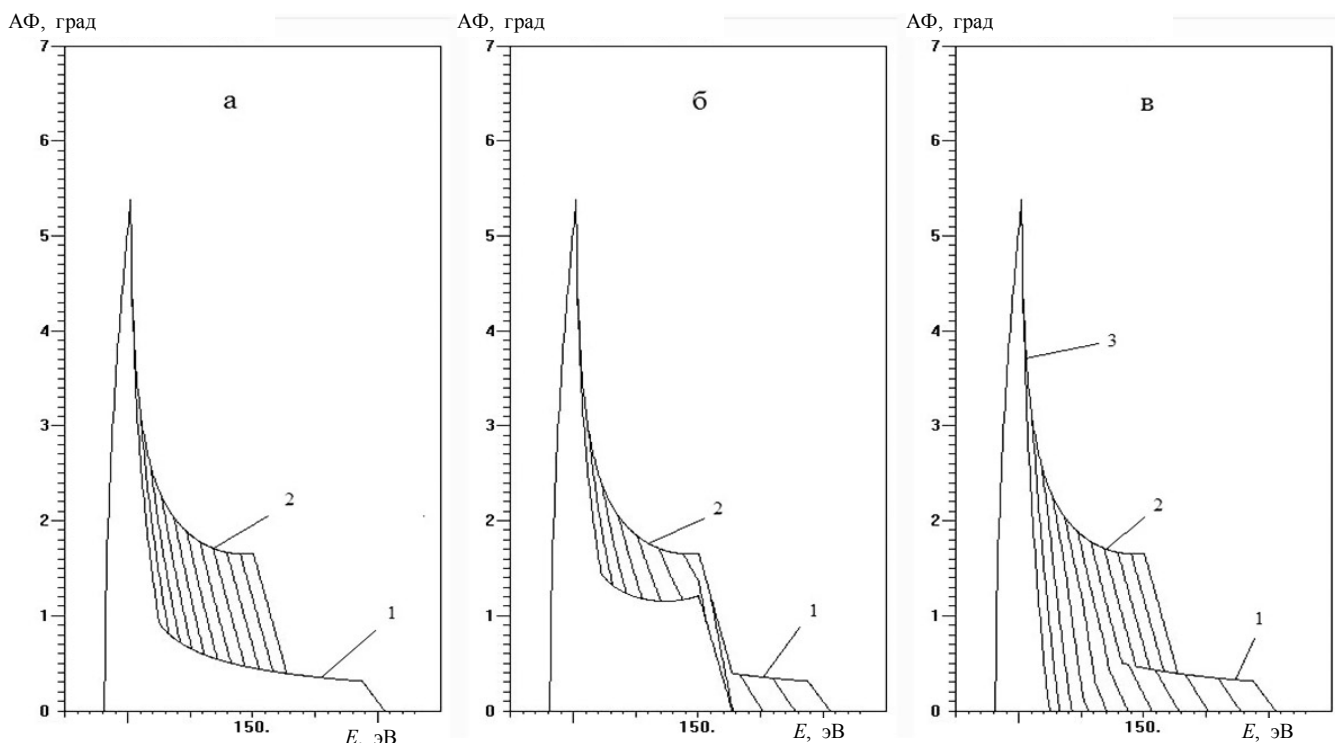


Рис. 2. Вид АФ ЦЗ при изменении входного углового зазора выше оптимальных значений.

а — меньший угол апертуры равен оптимальному, а больший угол апертуры изменяется; б — больший угол апертуры равен оптимальному, а меньший угол апертуры изменяется; в — согласованное уменьшение входного углового зазора к оптимальным значениям. 1 — хвост АФ для меньшего угла апертуры; 2 — хвост АФ для большего угла апертуры. Шаг изменения угла —  $0.5^\circ$

**Фокусировка первого порядка  
(минимум на кривых  $E_{L,R}(\theta)$ )**

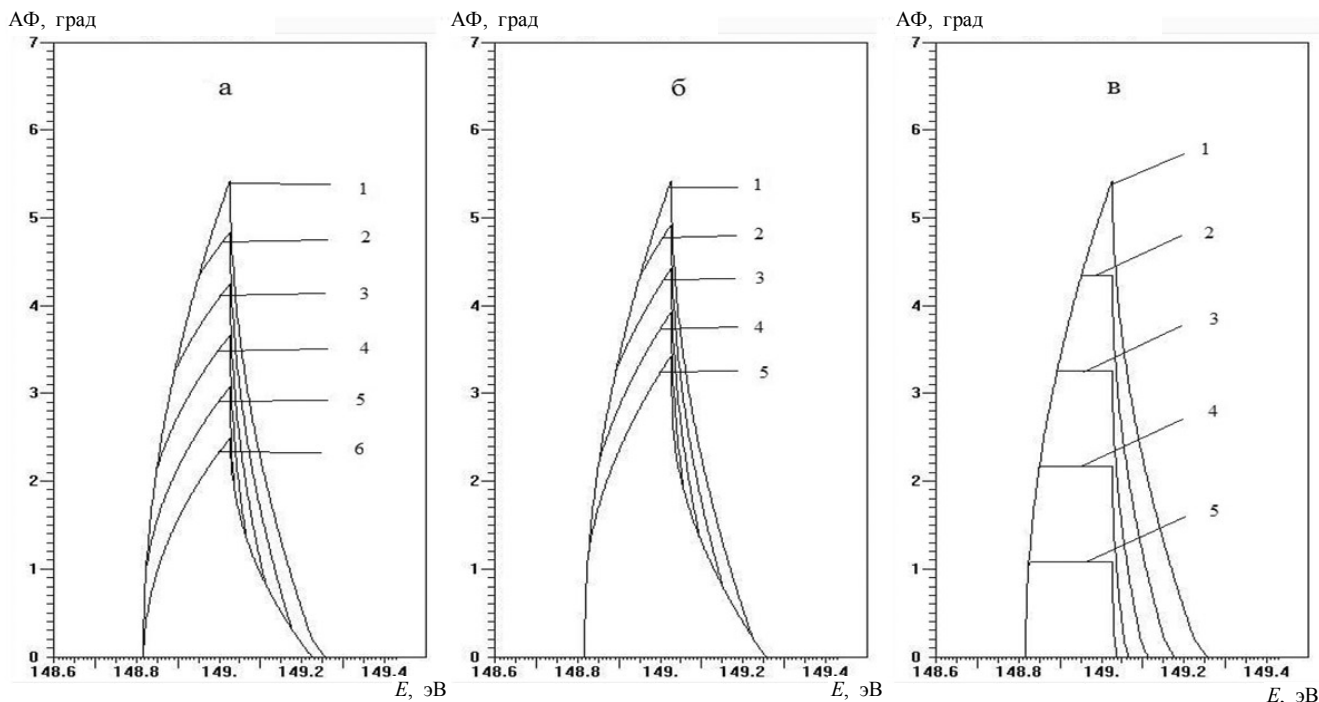
Как следует из работы [7], в рассматриваемом случае может наблюдаться АФ в виде пика (несимметричного) и хвоста, расположенного с одной стороны (справа) от пика. Причем на хвосте возможны до трех изломов, которые могут быть хорошо видны, а могут быть сглажены (смазаны).

Учитывая несимметричность графиков  $E_{L,R}(\theta)$  относительно минимумов этих кривых (см. рис. 1, б), можно сделать вывод о несимметричности графика АФ.

Обозначим через  $\theta_{min}$  и  $\theta_{max}$  те углы старта, которые соответствуют пересечению графика функции  $E_L(\theta)$  с горизонтальной прямой  $E = E_{peak}$ , где  $E_{peak}$  — энергия пика АФ. Для рассматриваемого случая она равна энергии минимума на кривой  $E_R(\theta)$ . Ясно, что при угловом растворе, большем чем  $(\theta_{min}, \theta_{max})$ , высота пика АФ не меняется с изменением этого зазора, а при меньшем угловом растворе с уменьшением зазора уменьшается. В работе [13] эти углы названы

оптимальными. Ниже мы будем придерживаться этого термина, а также обозначим  $\theta_N$  — меньший угол старта электронов, а  $\theta_K$  — больший угол старта.

Результаты расчета АФ ЦЗ в режиме работы с одной фокусировкой первого порядка и при изменении апертурных углов представлены на рис. 2. На рис. 2, а, показано изменение вида АФ для случая, когда меньший угол апертуры равен оптимальному ( $\theta_N = \theta_{min}$ ), а больший угол апертуры ( $\theta_K$ ) уменьшается от значения, большего оптимального ( $\theta_{max} + 5$ )°, до оптимального ( $\theta_{max}$ ). Рис. 2, б, — вид пика АФ для случая, когда больший угол апертуры равен оптимальному ( $\theta_K = \theta_{max}$ ), а меньший угол апертуры ( $\theta_N$ ) увеличивается от значения, меньшего оптимального ( $\theta_{min} - 3$ )°, до оптимального ( $\theta_{min}$ ). Рис. 2, в, — вид АФ ЦЗ при согласованном уменьшении углового зазора к оптимальным значениям  $\theta_{min}$  и  $\theta_{max}$ . Во всех случаях цифрой 1 отмечен хвост АФ, соответствующий меньшему углу апертуры, цифрой 2 — большему углу апертуры, шаг изменения углов равен 0.5°.



**Рис. 3.** Вид аппаратной функции ЦЭА при величинах входного углового зазора, меньших оптимального значения.

а — зафиксирован меньший угол апертуры на уровне  $\theta_{min}$  и больший угол апертуры уменьшается; б — зафиксирован больший угол апертуры на уровне  $\theta_{max}$  и меньший угол увеличивается; в — и меньший, и больший углы апертуры согласованно увеличиваются и уменьшаются соответственно. 1–6 — пики при оптимальных значениях апертуры; увеличению номера пика соответствует увеличение величины отклонения апертуры от оптимальной

В работе [10] для рассматриваемого случая фокусировки первого порядка, правда, для схемы кольцо—кольцо, когда оба кольца находятся на внутреннем цилиндре, приведены графики пика АФ при уменьшении "угловой расходимости" от больших величин до почти оптимальных. Крылья пика АФ при этом уменьшались.

На практике, на наш взгляд, наилучшей является апертура с углами от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$  или чуть большая, чтобы исключить резкое падение максимума пика при уменьшении апертуры. Заметим, что вблизи углов  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  (в диапазоне около  $0.5^\circ$ ) вид пика меняется мало. Поэтому для лучшей работы АЭА типа ЦЗ можно выставлять значения углов, несколько большие значений  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ . При величине апертуры, меньшей оптимального значения ( $\theta_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$ ), высота пика АФ должна уменьшаться. Это демонстрирует рис. 3.

На рис. 3 цифре 1 соответствует пик АФ при оптимальных значениях апертуры, а большим значениям цифр — большие величины отклонения от оптимальных значений. На рис. 3, а, зафиксирован меньший угол апертуры на уровне  $\theta_{\min}$  и больший угол апертуры уменьшается от  $\theta_{\max}$  до приблизительно середины между  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ . Видно, что с уменьшением большего угла апертуры, максимальное значение пика быстро уменьшается.

В случае, когда зафиксирован больший угол апертуры на уровне  $\theta_{\max}$ , и меньший угол увеличивается от  $\theta_{\min}$  до приблизительно середины между  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  (см. рис. 3, б), вид графика подобен предыдущему, и с увеличением меньшего предела апертуры максимальное значение пика также быстро уменьшается.

На рис. 3, в, и меньший, и больший углы апертуры согласованно соответственно увеличиваются и уменьшаются от  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  до приблизительно середины между  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ . Видно, что вершина пика АФ становится плоской, а правая сторона пика все более приближается к правой стороне П-образного пика.

На рис. 4 представлены пики АФ при оптимальных значениях углов апертуры, полученные при разных размерах выходной диафрагмы (положение центра выходной диафрагмы при этом фиксировано). Понятно, что большим значениям зазора ВД соответствуют большие пики АФ. Видно, что ни при какой ВД вершина пика АФ не становится плоской. Однако увеличение пропускания методом увеличения зазора выходной диафрагмы ведет к почти пропорциональному увеличению полуширины пика.

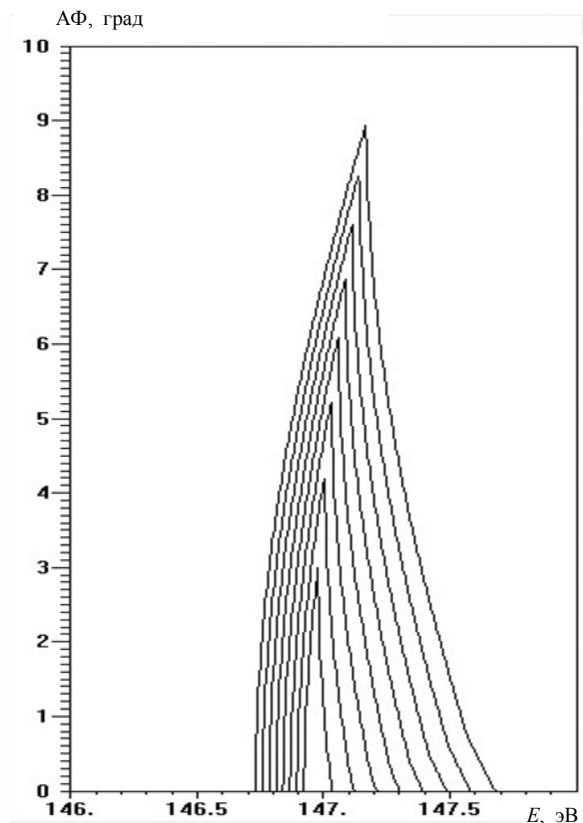


Рис. 4. Вид АФ ЦЗ в режиме одной фокусировки первого порядка при разных размерах выходной диафрагмы. Для каждого размера ВД установлены оптимальные значения углов апертуры

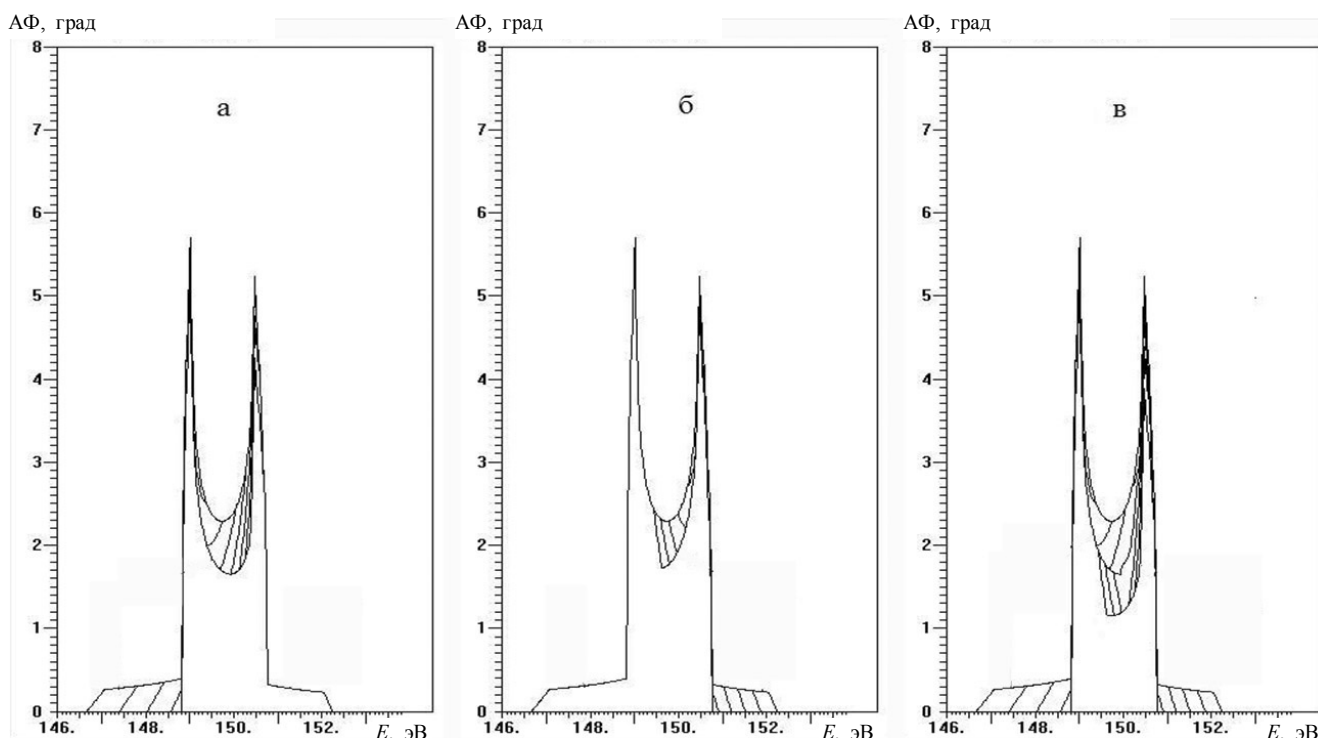
Таким образом, для эффективной работы АЭА типа ЦЗ в режиме одной фокусировки первого порядка необходимо с помощью выходной диафрагмы выбрать требуемые пропускание и разрешение и потом для достижения лучшей АФ независимо выставить меньший и больший углы апертурной диафрагмы ( $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ ). Вышеприведенные графики дают возможность осуществить это действие.

#### Фокусировка первого порядка (максимум на кривых $E_{L,R}(\theta)$ )

Все очень похоже на только что рассмотренный случай, только пик оказывается ограниченным со стороны больших энергий с хвостом со стороны меньших энергий.

#### ДВЕ ФОКУСИРОВКИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Этот случай уже рассматривался в работах [8–10], в которых, однако, было выбрано очень малое количество точек отображения. Вследствие этого графики АФ оказались сглаженными.



**Рис. 5.** Вид АФ ЦЗ в режиме двух фокусировок первого порядка при различных значениях апертурных углов. а — меньший угол апертуры равен оптимальному, а больший угол апертуры уменьшается; б — больший угол апертуры равен оптимальному, а меньший угол апертуры увеличивается; в — согласованное уменьшение входного углового зазора к оптимальным значениям

Вид полученных в данной работе пиков для случая двух фокусировок первого порядка приведен на рис. 5. Для этого режима в качестве оптимальных углов можно использовать  $\theta_{\min}$  для левого пика и  $\theta_{\max}$  для правого пика.

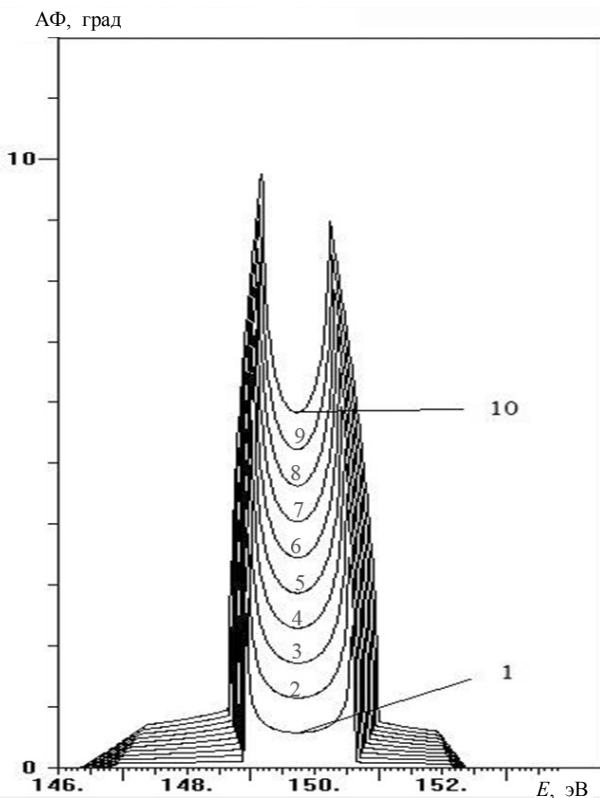
На рис. 5 представлен вид АФ ЦЗ для случая двух фокусировок первого порядка при изменении апертурных углов от значений, при которых угловой растров больше оптимального, до оптимальных значений ( $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ ). Рис. 5, а, — вид пика АФ для случая, когда меньший угол апертуры равен оптимальному ( $\theta_N = \theta_{\min}$ ), а больший угол апертуры ( $\theta_K$ ) уменьшается от значения, большего оптимального ( $\theta_{\max} + 5^\circ$ ), до оптимального ( $\theta_{\max}$ ). Рис. 5, б, — вид пика АФ для случая, когда больший угол апертуры равен оптимальному ( $\theta_K = \theta_{\max}$ ), а меньший угол апертуры ( $\theta_N$ ) увеличивается от значения, меньшего оптимального ( $\theta_{\min} - 3^\circ$ ), до оптимального ( $\theta_{\min}$ ). Рис. 5, в, — вид АФ ЦЗ при согласованном уменьшении углового зазора к оптимальным значениям  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$ . Во всех случаях шаг изменения углов равен  $0.5^\circ$ .

Так как левый пик расположен на хвосте правого пика, то при уменьшении левого хвоста, левая вершина слегка уменьшается в амплитуде и при этом начинает уменьшаться перешеек между вершинами (см. рис. 5, а). При уменьшении большего апертурного угла поведение зеркально аналогично (см. рис. 5, б). А при согласованном уменьшении апертуры (снизу и сверху) видно, что, уменьшая апертуру, можно убрать хвосты и несколько понизить уровень перешейка между вершинами, при этом сами вершины понизятся незначительно (см. рис. 5, в).

Таким образом, отсечение лишних апертурных углов в рассматриваемом случае позволяет удалить хвосты справа и слева на графике АФ.

В режиме двух фокусировок первого порядка увеличение размера зазора выходной диафрагмы, при фиксированной величине апертуры (значение апертуры, большее оптимального) приводит (как показано на рис. 6) к росту пропускания и некоторому росту совместной полуширины пиков.

Если вернуться к рис. 1, в, то видно, что с уменьшением расстояния от точки старта до ВД вершины пика АФ сближаются и на некотором расстоянии сливаются (пик отмечен цифрой 6).



**Рис. 6.** Вид пика АФ ЦЗ в режиме двух фокусировок первого порядка при изменении размера зазора выходной диафрагмы. При этом величина зазора апертуры является фиксированной (значение апертуры, большее оптимального). Пояснения в тексте

Но это еще не фокусировка второго порядка. Этот самый высокий пик, по-видимому, связан с известным эффектом минимальной ширины пучка. Однако это находится в конфронтации с некоторыми графиками работ [8–10], в которых пик, якобы соответствующий минимальной ширине пучка, имел двуглавую вершину и полуширина этого пика была в несколько раз больше полуширины пика, соответствующего фокусу второго порядка.

На рис. 7 представлены результаты изучения влияния апертуры на вид пика АФ при выполнении условия минимальной ширины пучка. Цифрой 1 отмечен левый хвост пика АФ, цифрой 2 — правый хвост пика, а цифрой 3 — центральная часть пика.

На рис. 7, а, показано, как изменяется вид пика АФ при изменении (увеличении) меньшего апертурного угла от некоторого значения, большего оптимального, а больший апертурный угол установлен большим оптимального. При этом и слева и справа от пика АФ существуют весьма заметные хвосты. Левый хвост уменьшается (делается короче вдоль оси энергий), и со значения угла, равного оптимальному значению, начинается некоторое понижение центральной части пика.

При уменьшении большего апертурного угла (см. рис. 7, б) все зеркально повторяется. Сперва становится короче правый хвост, и при значении, равном оптимальному, правый хвост совсем исчезает. Затем при значениях большего апертурного угла, меньших оптимального, понижается центральная часть пика АФ.

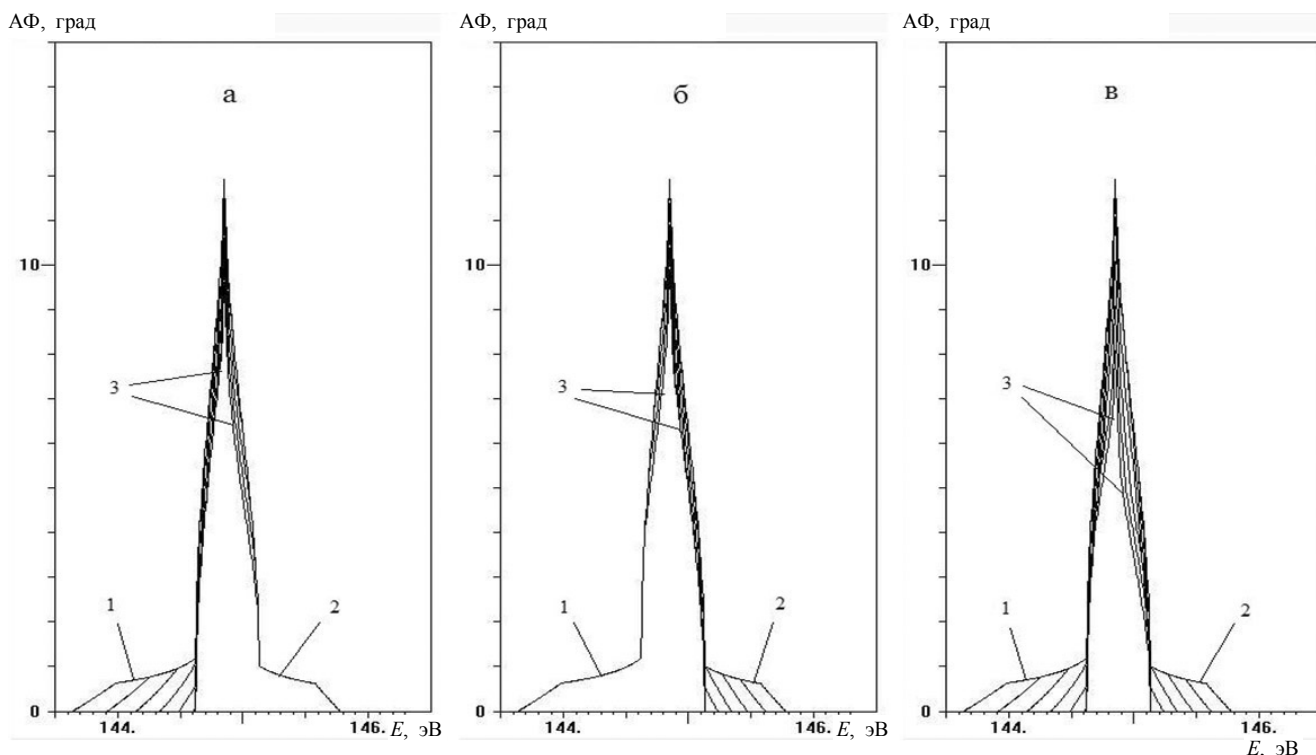
При согласованном уменьшении апертуры со стороны меньших и больших значений (см. рис. 7, в) сперва при величине углового зазора, большей оптимальной, одновременно укорачиваются хвосты, а при значениях, меньших оптимального зазора, начинает уменьшаться центральная часть пика АФ.

В работе [13] приведен график АФ для анализатора, близкого по типу к цилиндрическому зеркалу, при выставленных оптимальных углах апертуры. Вид этого графика весьма близок к тем графикам рис. 7, которые построены при оптимальных углах апертуры.

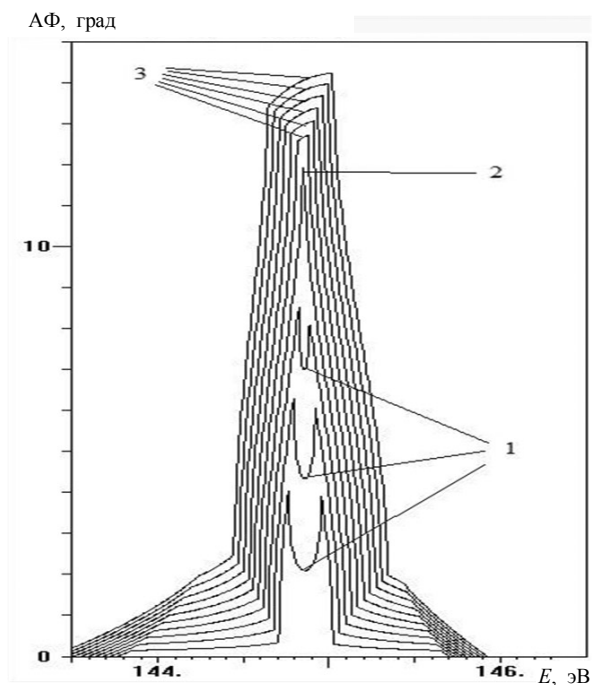
Интересно посмотреть, что будет происходить с пиком АФ, полученным в режиме минимальной ширины пучка, если менять величину зазора выходной диафрагмы. Результаты этих вычислений представлены на рис. 8. Показан пик, полученный для режима минимальной ширины пучка (величина зазора ВД 0.02 мм) при апертурных углах, больших оптимальных значений, (отмечен цифрой 2). При уменьшении величины зазора ВД пик имеет двуглавый характер, характерный для режима двух фокусировок первого порядка (эти пики отмечены цифрой 1). При увеличении зазора ВД вершина пика становится скошенной плоской (эти пики отмечены цифрой 3). Это объясняется тем, что для каждого положения ВД существует только одно значение зазора ВД, которому соответствует условие минимальной ширины (если оно для данного положения ВД вообще возможно). Поэтому двуглавость пиков в работе [10] объясняется тем, что они не соответствуют условию минимальной ширины.

### ФОКУСИРОВКА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Как было сказано выше, когда постепенно ВД приближается ( $Z$  уменьшается) к точке старта, пики АФ, соответствующие фокусировкам первого порядка, сближаются. При некотором расстоянии от точки старта они сливаются, и (через некоторое расстояние) получается фокусировка второго порядка. При этом как на графике зависимости  $Z(\theta)$ , так и на графике зависимостей  $E_{L,R}(\theta)$  наблюдается весьма значительный плоский участок (выполживание, прохождение через точку перегиба). Очевидно, что при бесконечно малой величине зазора ВД условие минимальной ширины и фокусировка второго порядка должны слиться.



**Рис. 7.** Вид пика АФ при выполнении условия минимальной ширины пучка. а — при увеличении меньшего апертурного угла; б — при уменьшении большего апертурного угла; в — при согласованном уменьшении апертуры со стороны меньших и больших значений. Пояснения в тексте



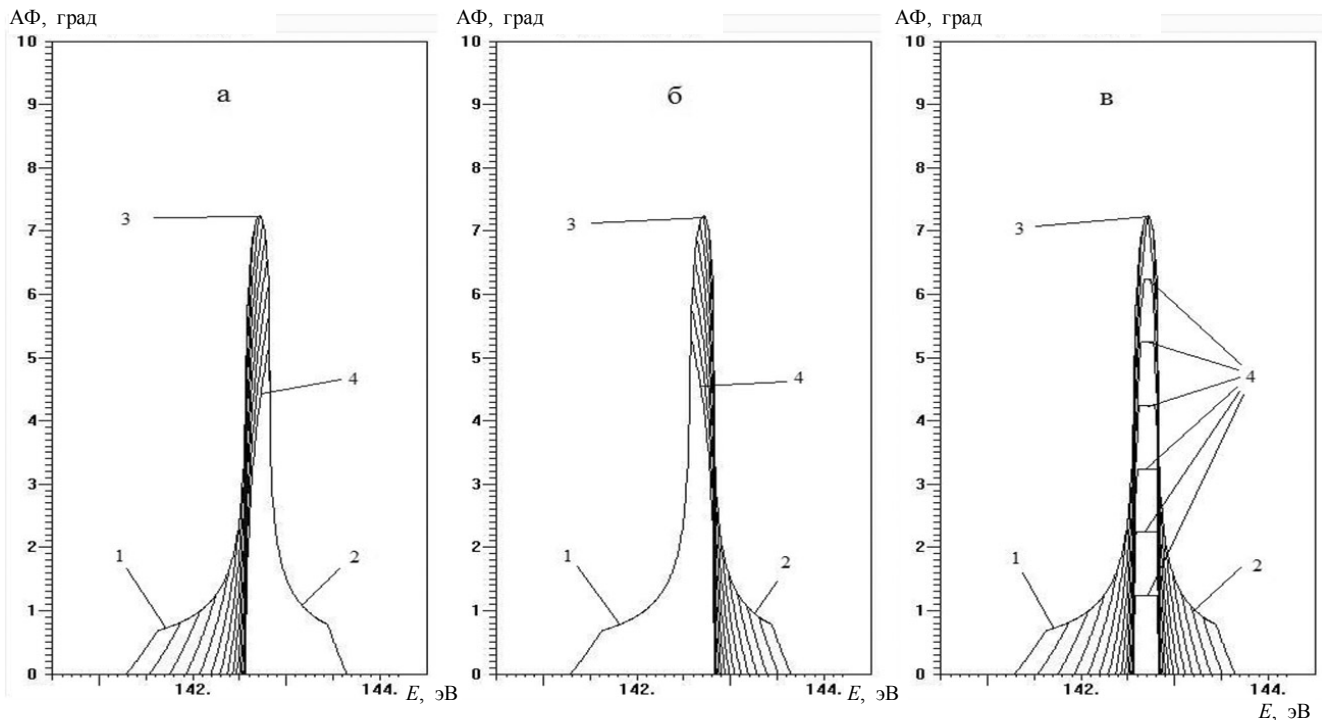
**Рис. 8.** Вид пика АФ при фиксированных апертурных углах, больших оптимального значения, фиксированном положении ВД и увеличении зазора ВД от 0.005 до 0.05мм. Пояснения в тексте

В результате получается практически симметричный пик (см. рис. 9), на котором точки излома наблюдаются только в результате отсечения краями апертурной диафрагмы. Хвосты в отличие от случаев фокусировки первого порядка получаются с разных сторон от вершины пика.

На графиках  $E_{L,R}(\theta)$  для случая бесконечно малого зазора ВД не существует экстремумов. При конечном зазоре ВД на графике  $E_R(\theta)$  (рис. 1, б, верхняя кривая пары) должны присутствовать и минимум, и максимум, однако энергетическая разница между ними должна быть весьма мала. Для определения оптимальных углов находим максимум входного углового зазора электронов, проходящих через ВД. Углы, соответствующие этому максимуму, и считаются оптимальными.

Как уже отмечалось, из работы [6] известно, что фокусировка второго порядка получается при  $\theta = 42^\circ 20'$  и при энергии, соответствующей  $p = 0.77$ . При других энергиях фокусировка второго порядка быть не может (считаем расстояние от ВД до точки старта и потенциал верхнего электрода фиксированными). При этом считается, что ВД имеет достаточно узкий зазор.





**Рис. 9.** Графики АФ ЦЗ, построенные для случая одной фокусировки второго порядка при изменении апертурных углов от значений, больших оптимальных, до значений, меньших оптимальных. Пояснения в тексте

На рис. 9 представлены виды АФ ЦЗ для случая одной фокусировки второго порядка. Апертура меняется относительно оптимального значения как в большую, так и в меньшую сторону. На этом рисунке цифрой 1 отмечен левый хвост при значениях меньшего угла апертуры, меньших оптимального; цифрой 2 — правый хвост при значениях большего угла апертуры, больших оптимального; цифрой 3 — вершина пика при значениях входного углового зазора, больших и равных оптимальному; цифрой 4 — вершина пика АФ при значениях входного углового зазора, меньших оптимального.

На рис. 9. показано, как, начиная с апертуры, большей оптимальной, изменяя меньший угол апертуры до оптимального значения (рис. 9, а), больший угол апертуры до оптимального значения (рис. 9, б) и согласованно и больший, и меньший углы к их оптимальным значениям (рис. 9, в), можно убрать хвосты слева или справа или и слева, и справа от пика. При этом величина сигнала в пике (высота пика) не изменяется. Если же один или оба апертурных угла становятся соответственно большими или меньшими оптимальных значений, то высота пика начинает уменьшаться, а в случае согласованного изменения апертурных углов (уменьшения величины углового зазора) вершина пика становится плоской и быстро уменьшается.

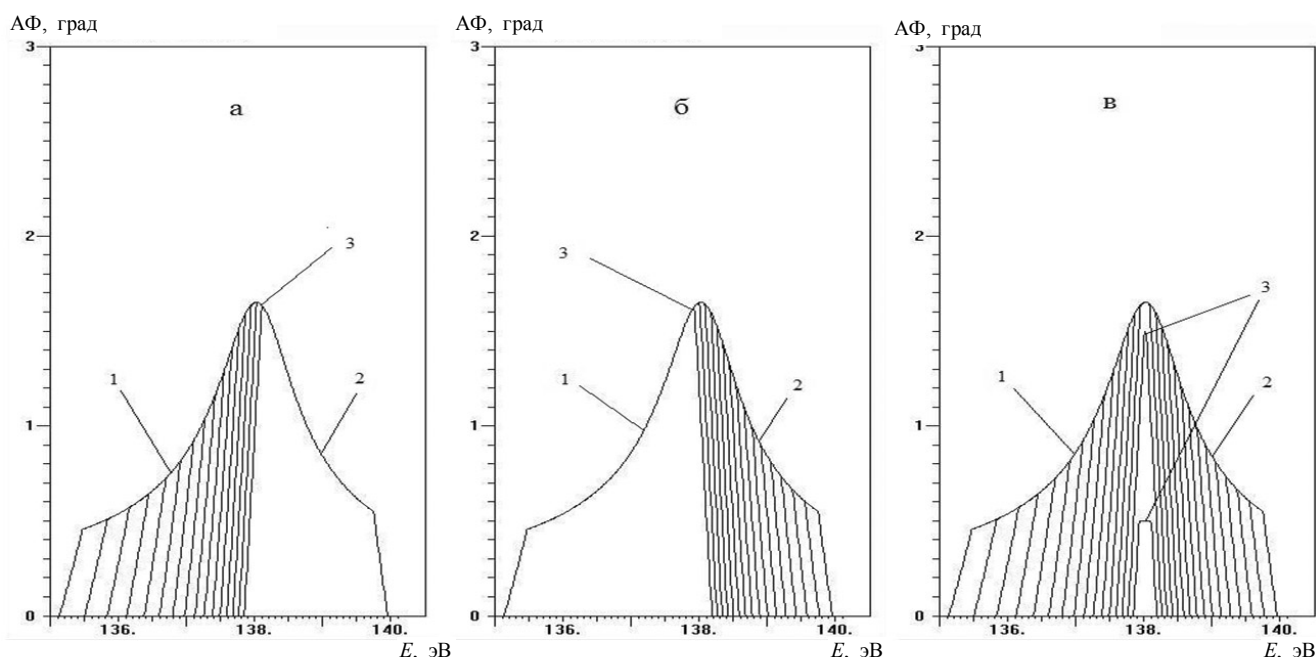
Из этого можно сделать вывод, что для случая одной фокусировки второго порядка для получения наилучшей эффективности работы ЭА (с точки зрения получения наибольшего пропускания и чтобы хвосты не мешали) следует выбрать  $\theta_N = \theta_{\min}$ ,  $\theta_K = \theta_{\max}$ . Вполне очевидно, что для каждого зазора ВД величины  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  будут свои.

### ОТСУТСТВИЕ ФОКУСИРОВКИ

При еще большем по сравнению с предыдущим случае приближении ВД к точке старта, на кривых  $Z(\theta)$  не остается ни экстремумов ни плато.

На рис. 10 представлены виды АФ в режиме отсутствия фокусировки при разных значениях апертуры и при фиксированном положении ВД и фиксированном зазоре ВД. Те значения меньшего и большего апертурных углов, при которых соответствующий хвост АФ минимален (практически исчезает), а вершина пика не уменьшается, будем считать оптимальными.

Цифрой 1 на рис. 10 отмечен левый хвост пика АФ при значениях меньшего угла апертуры меньших и равных оптимальному; цифрой 2 — правый хвост пика АФ при значениях большего апертурного угла, больших и равных оптимальному; цифрой 3 — левый или правый хвосты пика АФ, когда



**Рис. 10.** Вид АФ при выполнении условия отсутствия фокусировки и изменении входного углового зазора. а — увеличение меньшего угла апертуры до значений несколько больших оптимальных; б — уменьшение большего угла апертуры; в — согласованное уменьшение углового зазора. Пояснения в тексте

соответствующий угол входа электронов соответственно больше или меньше оптимального. На рис. 10, в, — вид пика, когда и меньший угол входа больше оптимального, и больший угол входа меньше оптимального.

Таким образом, в режиме отсутствия фокусировки и изменяя (уменьшая) апертуру можно практически полностью убрать хвосты, и существует оптимальное значение входного углового зазора, более которого — убираются хвосты, а менее — уменьшается высота пика.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наибольшее пропускание (наибольшая высота пика АФ) осуществляется в режиме выполнения условия минимальной ширины пучка при реализации двух фокусировок первого порядка недалеко от режима фокусировки второго порядка, когда две фокусировки первого порядка уже практически слились.

Для любого режима работы АЭА можно выбором соответствующей "оптимальной" апертуры добиться отсутствия (или минимальности) хвостов пика АФ без уменьшения амплитуды пика (пропускания). Дальнейшее уменьшение апертуры приводит к уменьшению высоты пика АФ. При согласованном уменьшении минимального и максимального углов апертуры меньше оптимальных величин вершина пика АФ становится плоской и

начинает быстро уменьшаться.

В области вблизи максимального пропускания и с уменьшением расстояния от источника до детектора пик АФ переходит от двуглавого пика к пику с одной вершиной.

Как рассмотрено в [1], существуют два основных метода развертки спектра.

1. Разворачивать спектр изменением потенциала на верхнем электроде (в пределах некоторого диапазона).

2. Применять предварительное замедление электронов до некоторой необходимой ЭА энергии и развертку осуществлять изменением замедляющего напряжения. При этом методе ЭА настроен на некоторую вполне определенную энергию.

В первом случае, как следует из приведенного выше материала, для разных энергий ЭА имеет разное разрешение, разное пропускание и разные оптимальные апертуры.

Во втором случае, когда электроны поступают в ЭА со вполне определенной энергией, для которой разрешение, пропускание известны и можно выставить оптимальную апертуру, неизвестной величиной является только пропускная способность замедляющей системы (ее изменение с изменением потенциала задержки). А эту функцию можно определить при калибровке прибора.

Развертка по потенциалу вблизи фокусировки второго порядка возможна от энергии максималь-

ного пропускания до области (и в пределах этой области) отсутствия фокусировки.

Каждой энергии и каждому размеру выходной диафрагмы соответствует своя оптимальная апертура и свое условие максимального пропускания. Поэтому при любых изменениях размера зазора выходной диафрагмы, положения выходной диафрагмы (и требуемого разрешения) рекомендуется проводить соответствующие корректировки входных углов (апертуры).

Если электроника АЭА позволяет на выходе наблюдать вид пика АФ, то выставив сперва максимально возможную апертуру, следует уменьшать поочередно меньший и больший углы апертуры, пока вершина пика не начнет уменьшаться, что является признаком того, что соответствующий угол пересек пределы оптимальной области углов. Этим мы весьма близко подойдем к оптимальной области.

Если электроника АЭА позволяет только выдавать (и записывать) полный ток в детекторе, то сперва настраиваем АЭА на какой-либо известный пик, а затем уменьшаем поочередно меньший и больший углы апертуры, пока сигнал (от пика) не начнет уменьшаться, что является признаком того, что соответствующий угол пересек пределы оптимальной области углов

Существует возможность, изменяя положение выходной диафрагмы, ее зазор и апертуру в процессе развертки по напряжению (по энергии), поддерживать для всего спектра одну форму АФ (и одно разрешение).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* Электростатические энергоанализаторы (Обзор) // ЖТФ. 1975. Т. 45, № 6. С. 1137–1169.
2. *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* Электростатические спектрометры для энергетического и углового анализа заряженных частиц (Обзор) // ЖТФ. 1988. Т. 58, № 2. С. 217–232.

3. *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978. 224 с.
4. *Козлов И.Г.* Современные проблемы электронной спектроскопии. М.: Атомиздат, 1978. 248 с.
5. *Yavor M.* Optics of charged particle analyzers. Advances in Imaging and Electron Physics. Elsevier, 2009. V. 157. 381 p.
6. *Заишквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С.* Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. 1966. Т. 36, № 1. С. 132–137.
7. *Шевченко С.И.* Метод вычисления аппаратной функции аксиальных электростатических энергоанализаторов // Научное приборостроение, 2010. Т. 20, № 2. С. 73–81.
8. *Аксела С., Каррас М., Песса М., Суонинен Е.* Исследование электронно-оптических свойств электронного спектрометра с коаксиальными цилиндрическими электродами // ПНИ. 1970. Т. 41, № 3. С. 41–45.
9. *Аксела С.* Анализ энергетического распределения в цилиндрических спектрометрах электронов // ПНИ. 1971. Т. 42, № 6. С. 61–63.
10. *Аксела С.* Аппаратная функция цилиндрического анализатора энергий электронов // ПНИ. 1972. Т. 43, № 9. С. 122–128.
11. *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* О возможности увеличения светимости энергоанализаторов за счет оптимизации входных параметров пучка // ЖТФ. 1975. Т. 45, № 3. С. 471–480.
12. *Абрамовиц М., Стиган И.* Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 830 с.
13. *Trubitsyn A.A.* A cylindrical mirror analyser with high energy resolution // J. Elec. Spectr. Rel. Phen. 1995. V. 73. P. 305–310.

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*

Контакты: *Шевченко Сергей Иванович,*  
shevsi@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 12.07.2010.

## SOME ASPECTS OF THE ENERGY ANALYZER WORK OF A CYLINDRICAL MIRROR TYPE. P. I

**S. I. Shevchenko**

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

The influence of the electron beams input angles on the form of the cylindrical energy analyzer apparatus function is investigated. It is shown that a choice of electron beams input angles in the energy analyzer it is possible to reduce a peaks trains considerably.

*Keywords:* axially energy analyzer, apparatus function, resolving power, transmission