

ФЭИ-2118



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В. П. СЕМЕНОВ, Л. А. ТРЫКОВ

**Оценка информационного качества  
и разрешения спектрометрических систем  
методом частотного анализа.  
Результаты апробации**

Обнинск — 1990

ФЭИ-2118

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В.П.Семёнов, Л.А.Трыков

ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОГО КАЧЕСТВА И РАЗРЕШЕНИЯ  
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО  
АНАЛИЗА. РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ

Обнинск - 1990

УДК 539.1.074.8

В. П. Семенов, Л. А. Триков.

Оценка информационного качества и разрешения спектрометрических систем методом частотного анализа. Результаты апробации.

ФЗИ- 2118. Обнинск, 1990. - 24 с.

Разработаны способы и принципиальные алгоритмы оценки информационного качества и энергетического разрешения спектрометрических систем методом частотного анализа на выделенном участке энергетического спектра. Приведены результаты апробации метода частотного анализа на ряде тестовых и реальных спектров.

The methods and basic algorithms for informative quality and energy resolution estimations of spectrometric systems into separate energy spectrum sector by means of the frequency analysis method are developed. The results of test and real spectra processing obtained by means of the frequency analysis method are presented.

## В В Е Д Е Н И Е

В раб. [1] определены понятия информационного качества и эквивалентного разрешения спектрометрических систем различных типов. Сформулирован общий подход к оценке информационного качества и разрешения, основанный на анализе пары спектров: истинного  $\varphi_0(E)$  (на входе спектрометрической системы) и измеренного  $\varphi(E)$  (на выходе спектрометрической системы).

В раб. [2] для оценки информационного качества и разрешения спектрометрических систем неклассического типа предложен метод частотного анализа, базирующийся на Фурье-анализе пары спектров  $\varphi_0(E)$ ,  $\varphi(E)$ . Как указано в раб. [2], существенным ограничением метода частотного анализа является то, что он дает усредненную по всему спектру оценку информационного качества  $q$  и абсолютного разрешения  $\Delta$ . Это важно в тех случаях, когда  $q$  и  $\Delta$  обнаруживают сильную зависимость от энергии либо спектры по каким-либо причинам "обрезаны", например, измерены выше или ниже определенного энергетического порога.

Целью настоящей работы является разработка способов оценки  $q$  и  $\Delta$  методом частотного анализа на произвольно выделенном участке энергетического диапазона спектров, а также апробация метода частотного анализа на тестовых и реальных спектрах.

Предлагаемая работа является продолжением работ [1] и [2], в ней использована терминология работ [1, 2].

### 1. ЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ ОТКЛИКА ДЛЯ УЧАСТКА СПЕКТРА

В раб. [2] показано, что существенным моментом предлагаемого метода оценки информационного качества и абсолютного разрешения спектрометрических систем является допущение, что эти величины не зависят от энергии на рассматриваемом отрезке энергетической шкалы. Это приемлемо в том случае, когда разрешение  $\Delta$  сравнимо по величине с областью существования спектра  $[E_{\min}, E_{\max}]$ , т.е.  $\Delta \leq E_{\max} - E_{\min}$ . Строго говоря, вопрос о зависимости  $\Delta$  от  $E$  полностью снимается при  $\Delta \approx E_{\max} - E_{\min}$ . Во многих случаях бывает достаточно, чтобы

$E_{\max} - E_{\min} \geq n \cdot \Delta$ , где  $n = 5 - 10$ . Более точно величину  $n$  можно определить, рассматривая конкретную спектрометрическую систему и условия измерения.

Для ряда спектрометрических систем и протяженных спектров, когда  $\Delta \ll E_{\max} - E_{\min}$ , это допущение является неприемлемым, так как  $q$  и  $\Delta$  представляют собой быстро меняющиеся функции энергии и могут изменяться в области существования спектра в десятки и более раз (например, нейтронные спектрометры с органическими сцинтилляторами). Выход из этого положения заключается в том, чтобы оценивать  $q$  и  $\Delta$  не на всей области существования спектра, а на достаточно узком участке энергетической шкалы, таком чтобы выполнялось соотношение  $n \cdot \Delta \approx E_{\max} - E_{\min}$ .

Обозначим левую и правую границы участка энергетической шкалы буквами  $E_1$  и  $E_2$  соответственно. Спектры  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi(E)$  отличаются от полных спектров тем, что их левая  $E_1$  и правая  $E_2$  границы (или одна из них) имеют характер вертикального среза. Если рассматривать спектр  $\varphi_0(E)$  на участке  $[E_1, E_2]$  изолированно от его "отрезанных" частей, то при воздействии на него спектрометрической системы с величиной абсолютного разрешения  $\Delta$  левая и правая границы среза измеренного спектра будут сглажены на глубину  $\Delta$ , т.е. измеренный спектр будет плавно нарастать от нуля до номинального значения у левой границы и соответственно спадать у правой границы с полной шириной нарастания и спада, примерно,  $2\Delta$ . Следовательно, спектр, который должен получиться при измерении участка спектра  $\varphi_0(E)$  в границах  $[E_1, E_2]$ , будет отличаться от вырезанного участка спектра  $\varphi(E)$  в области границ  $E_1$  и  $E_2$  на полосе шириной  $2\Delta$ .

Для получения правильной оценки разрешения методом частотного анализа на вырезанном участке спектра, надо чтобы вырезанный участок<sup>3</sup>  $\varphi(E)$  плавно нарастал и спадал вблизи границ  $E_1$  и  $E_2$  в соответствии с искомым типом функции отклика и искомой величиной разрешения. Устранить это противоречие можно следующим образом.

В раб. [1] задача определения типа функции отклика формулируется как задача отыскания наиболее подходящей в некотором смысле функции отклика из заранее заданного набора типов функций отклика. Если набор невелик, то решить эту задачу можно путем простого перебора.

Предположим, что оценка разрешения производится для такого типа функции отклика, что при искомом  $\Delta$  выполняются соотношения (40) или (41) из раб. [1], т.е. тип функции отклика соответствует реаль-

ной спектрометрической системе. Обозначим измеренный спектр  $\varphi(E)$ , сглаженный вблизи границ  $E_1$  и  $E_2$  в соответствии с выбранным типом функции отклика и каким-либо значением разрешения  $\Delta_c$  символом  $\varphi_c(E)$ , искомое разрешение обозначим  $\Delta$ . Спектр  $\varphi_c(E)$  определен на отрезке  $[E_1 - \Delta_c, E_2 + \Delta_c]$ , на отрезке  $[E_1 + \Delta_c, E_2 - \Delta_c]$  он совпадает со спектром  $\varphi(E)$ , вблизи границ на отрезках  $[E_1 - \Delta_c, E_1 + \Delta_c]$  и  $[E_2 - \Delta_c, E_2 + \Delta_c]$  отличается от  $\varphi(E)$ .

Вычислим частотную функцию отклика (ЧФО, см. раб. [2]) для участков спектров  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi_c(E)$ . Если  $\Delta_c < \Delta$ , то в спектре мощности  $|F_c(\omega)|$  сильнее будут выражены высокочастотные компоненты, чем в спектре мощности  $|F(\omega)|$ , вычисленном при  $\Delta_c = \Delta$ , ЧФО  $P_c(\omega)$  будет больше  $P(\omega)$  в области высоких частот. Вычисленное по  $P_c(\omega)$  приближенное разрешение  $\Delta_n$  будет меньше или, в крайнем случае, равно  $\Delta$ . Но так как спектр  $\varphi_c(E)$  на отрезке  $[E_1 + \Delta_c, E_2 - \Delta_c]$  (т.е. там, где он совпадает с  $\varphi(E)$ ) измерен с разрешением большим, чем разрешение  $\Delta_c$  вблизи границ, то  $\Delta_n(\omega)$  будет меньше в области высоких частот  $P_c(\omega)$ , следовательно  $\Delta_c$  будет меньше  $\Delta_n$ . В худшем случае, когда спектры  $\varphi_c(E)$  и  $\varphi(E)$  близки по форме к линейной функции на отрезке  $[E_1, E_2]$  и разрешение вследствие этого определяется только гладкостью границ спектра  $\varphi_c(E)$ ,  $\Delta_c$  будет равно  $\Delta_n$ .

Таким образом, всегда должно выполняться соотношение

$$\Delta_c \leq \Delta_n \leq \Delta. \quad (1)$$

Наоборот, если  $\Delta_c > \Delta$ , должно выполняться соотношение

$$\Delta_c \geq \Delta_n \geq \Delta. \quad (2)$$

Подобную цепочку рассуждений можно построить для информационного качества  $q$ . В результате получим соотношения:

$$\text{если } \Delta_c < \Delta, \text{ то } q_c \geq q_n \geq q; \quad (3)$$

$$\text{если } \Delta_c > \Delta, \text{ то } q_c \leq q_n \leq q. \quad (4)$$

Формулы (1) - (4) пригодны для построения алгоритмов получения искомого ЧФО, разрешения и информационного качества на участках спектров.

Принципиальные алгоритмы вычисления ЧФО, разрешения и информационного качества для участка спектров. Построим алгоритмы, используя формулы (1) и (2) для разрешения. Таким же образом можно построить алгоритмы для получения информационного качества, используя формулы (3) - (4), однако в первом случае алгоритмы более наглядны.

А так как  $\Delta$  и  $\varphi$  связаны простыми соотношениями (см. раб. [1]), то получив  $\Delta$ , легко получить  $\varphi$ .

Используя (1) и (2), можно построить три принципиальных алгоритма вычисления

**А л г о р и т м 1.** Первый возможный алгоритм представляет собой итерационный процесс поиска  $\Delta$  слева, т.е. со стороны меньших значений. Обозначим  $\varphi_n(E)$   $n$ -е приближение спектра  $\varphi_c(E)$  со сглаженными по разрешению  $\Delta_c$  границами,  $R_n(\omega)$  - ЧФФ для пары спектров  $\varphi_c(E)$  и  $\varphi_n(E)$ ,  $\Delta_n$  - вычисленное по  $R_n$  абсолютное разрешение. Первым приближением будем считать  $\varphi_1(E) = \varphi(E)$ .

Итерационный процесс строится следующим образом ( $n = \overline{1, N}$ ):

Шаг 1. Для пары спектров  $\varphi_c(E)$ ,  $\varphi_n(E)$  вычисляют  $R_n$  и  $\Delta_n$ .

Шаг 2. Проверяют условие окончания итерационного процесса.

Так как значение  $\Delta$  неизвестно, то близость  $\Delta_n$  к  $\Delta$  можно проверить по плотности расположения точек  $\Delta_n$  и  $\Delta_{n+1}$ .

Условие окончания будет выглядеть так: если  $|\Delta_n - \Delta_{n+1}|/\Delta_n < \varepsilon$ , то процесс окончен, иначе переход к шагу 3.  $\varepsilon$  - заданная величина, определяют её значение экспериментальным путём.

Шаг 3. Строят сглаженные границы спектра  $\varphi(E)$ , например, интегрированием спектра  $\varphi_c(E)$  с предполагаемой функцией отклика и  $\Delta_c = \Delta_n$ . Этот спектр  $\varphi_c(E)$  с новыми сглаженными границами считают приближением  $\varphi_{n+1}(E)$ . Далее переход к шагу 1.

Из соотношения (1) следует, что

$$\Delta_n \leq \Delta_{n+1} \leq \Delta. \quad (5)$$

Поэтому итерационный процесс сходится,  $\Delta_n \rightarrow \Delta$  при возрастании  $n$ . Скорость сходимости определяется видом спектров  $\varphi_c(E)$  и  $\varphi(E)$ .

**А л г о р и т м 2.** Второй возможный алгоритм представляет собой итерационный процесс поиска  $\Delta$  справа, т.е. со стороны больших значений. Он во всем аналогичен первому алгоритму. Из соотношения (2) следует

$$\Delta_n \geq \Delta_{n+1} \geq \Delta, \quad (6)$$

что обеспечивает его сходимость.

Существенным недостатком двух предложенных алгоритмов является недостаточная скорость сходимости в ряде случаев (скорость сходимости определяется видом спектров  $\varphi_c(E)$  и  $\varphi(E)$ ). Кроме того, величину  $\varepsilon$ , определяющую окончание процесса, необходимо задавать явно, при этом неясно, как находить оптимальное  $\varepsilon$ .

**А л г о р и т м 3.** Третий возможный алгоритм представляет собой поиск  $\Delta$  методом деления отрезка пополам.

**Шаг 1.** Задают или отыскивают нулевое приближение разрешения  $\Delta_0$ . Например, можно считать нулевым приближением разрешение, вычисленное по ЧФО для участка спектров  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi(E)$  без сглаживания границ.

**Шаг 2.** Задают шаг  $h$  на энергетической шкале. Если  $\Delta_0$  является левой границей  $\Delta$ , т.е.  $\Delta_0 < \Delta$ , то отыскивают интервал  $[\Delta_1, \Delta_2]$ , такой что

$$\Delta_1 = \Delta_0 + (k-1)h < \Delta < \Delta_0 + kh = \Delta_2, \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Если  $\Delta_0$  является правой границей, т.е.  $\Delta_0 > \Delta$ , то отыскивают интервал  $[\Delta_1, \Delta_2]$ , такой что

$$\Delta_1 = \Delta_0 - kh < \Delta < \Delta_0 - (k-1)h = \Delta_2, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Интервал  $[\Delta_1, \Delta_2]$  длиной  $h$  содержит в себе искомое значение  $\Delta$ .

Отношение неравенства  $\Delta_0$  или любого другого  $\Delta_n$  к истинному  $\Delta$  устанавливает следующим образом. По  $\Delta_n$  строят сглаженные границы спектра  $\varphi(E)$ . Вычисляют  $\rho_c(\omega)$  для пары спектров  $\varphi_0(E)$ ,  $\varphi_c(E)$  и  $\Delta_n$ . Исходя из формул (1) и (2) имеем:

$$\text{если } \Delta_n \geq \Delta, \text{ то } \Delta_n \geq \Delta; \quad (9)$$

$$\text{если } \Delta_n \leq \Delta, \text{ то } \Delta_n \leq \Delta. \quad (10)$$

**Шаг 3.** На отрезке  $[\Delta_1, \Delta_2]$  решение отыскивают методом деления отрезка пополам.  $\Delta_n = (\Delta_1 + \Delta_2)/2$  считается решением, если

$$|\Delta_2 - \Delta_1|/\Delta_n = h_n/\Delta_n < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - заданный уровень относительной погрешности  $\Delta$ . Если нет, то переход к шагу 4.

**Шаг 4.** Если  $\Delta_n \leq \Delta$ , то левой границей считаем  $\Delta_n$ , т.е.  $\Delta_1 = \Delta_n$ . Если  $\Delta_n \geq \Delta$ , то изменяем правую границу,  $\Delta_2 = \Delta_n$ . Переход к шагу 3.

Процесс сходится очень быстро. Существование и единственность решения определены выполнением неравенств (1) и (2). Этот алгоритм значительно более эффективен, чем два первых, так как при любых парах спектров  $\varphi_0(E)$ ,  $\varphi(E)$ , если только выполняются строгие неравенства

$$\Delta_c < \Delta_n < \Delta \quad \text{или} \quad \Delta < \Delta_n < \Delta_c,$$

процесс быстро сходится, кроме того, нет проблемы выбора условия окончания процесса.  $\varepsilon$ .



Алгоритм № 3 может иметь различные модификации: поиск границ на шаге 2 можно осуществлять на логарифмической шкале энергий, деление отрезка  $[\Delta_1, \Delta_2]$  можно производить по золотому сечению и т.д.

Описанные алгоритмы дают способы отыскания ЧФФ, разрешения (информационного качества) для участка спектра. Предположение о том, что тип функции отклика соответствует реальной спектрометрической системе, не сужает возможности применения алгоритмов, так как если такого соответствия нет, то решение должно отбрасываться.

Предложенный способ отыскания ЧФФ и разрешения (информационного качества) на участке спектра, дает возможность обойти принципиальные ограничения рассматриваемого метода частотного анализа - требование о независимости разрешения от энергии на анализируемом участке спектра. Беря по очереди узкие участки спектра (так, чтобы выполнялось условие  $n \cdot \Delta \approx E_{max} - E_{min}$ ,  $n = 5 - 10$ ), можно оценить разрешение и информационное качество как функцию энергии на всем спектре.

## 2. ПРИМЕРЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО КАЧЕСТВА И РАЗРЕШЕНИЯ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Вычисление информационного качества и разрешения было выполнено на ЭВМ для нескольких пар  $\varphi_0(E), \varphi(E)$  тестовых и реальных спектров с помощью разработанных программ. Целью вычислений являлась проверка изложенного выше метода частотного анализа.

Тестовые спектры, вариант I. В качестве входного  $\varphi_0(E)$  спектра<sup>9</sup> была взята функция, представляющая собой сумму двух рядом расположенных линий (см. рис. 1, спектр I). В качестве выходного  $\varphi(E)$  спектра была взята функция, полученная интегрированием  $\varphi_0(E)$  с функцией отклика типа плотности нормального распределения,

$\sigma = 1,5$  МэВ. Т.е.  $\varphi(E)$  представлял собой результат измерения  $\varphi_0(E)$  условным спектрометром с функцией отклика типа плотности нормального распределения и разрешением  $\Delta = 3,54$  МэВ (рис. 1, спектр № 3). Спектры были векторизованы путем разбиения области

определения спектров [ 0,12 МэВ ] на 24 равных интервала и усреднением значений спектров в каждом интервале длиной 0,5 МэВ.

Погрешность векторизации и считывания была принята равной 2 % от среднего значения спектра, её абсолютное значение составляло 0,03 (спектр нормирован на единицу). Теоретическое (истинное) значение информационного качества  $q_{и} = 0,445 \text{ МэВ}^{-2}$ .

Расчет был выполнен для трех типов функций отклика: плотности нормального распределения, равнобедренного треугольника, прямоугольника. Результаты приведены в табл. I.

При погрешностях в спектрах, равных только ошибкам векторизации и считывания (собственные относительные статистические погрешности спектров  $\delta\varphi_0 = \delta\varphi = 0$ ), искомым типом функции отклика является плотность нормального распределения, так как  $\Omega < \chi^2_M$  (см. раб. [2], формула (78)). Вычисленное значение  $q = 0,466 \pm 0,009$  практически совпадает в пределах погрешности с истинным  $q_{и} = 0,445$ . Для других типов функций отклика  $\Omega > \chi^2_M$ .

При увеличении погрешностей в спектрах, начиная с  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 40\%$ , все три типа функции отклика являются допустимыми, так как для всех них  $\Omega < \chi^2_M$ . Треугольная функция отклика не отличима от плотности нормального распределения уже при  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 10\%$ , что вполне естественно, так как по форме эти функции отклика мало отличаются.

Вычисленные погрешности  $q$  значительно больше реального отклонения  $q$  от истинного значения, т.е.  $|q - q_{и}| \ll \delta q$ . Происходит это потому, что реальные погрешности в спектрах равны ошибкам векторизации и считывания, искусственно заданные дополнительные погрешности  $\delta\varphi_0$  и  $\delta\varphi$  значительно превосходят реальные.

Вычисленные значения  $q$  и  $\Delta q$  совпадают в пределах статистических погрешностей для равноправных функций отклика, т.е. когда для этих функций отклика выполняется соотношение  $\Omega \approx \chi^2_M$ .

Для проверки корректности вычисленных значений погрешностей  $q$  и  $\Delta$  сделаем простейшую прямую оценку погрешности разрешения.

Пусть спектр  $\varphi(E)$  задан в виде функции плотности вероятности нормального распределения

$$\varphi(E) = \exp[-(E-E_0)^2/2\sigma^2].$$

Максимальное значение  $\varphi(E) = 1$ .  $\varphi(E) = 0,5$  в точках

$$E = E_0 \pm \sqrt{2 \ln 2} \cdot \sigma.$$

Таблица I. Результаты расчета информационного качества  $q$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_3$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  по тестовым спектрам (вариант I).  $\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧФО.

Дополнит. относитель- ные погреш- ности спек- тров $\delta\varphi_0, \delta\varphi, \%$	Наименование вычисленных величин	Типы функций отклика		
		Плотность нормального распредел.	Треугольник (равнобе- денный)	Прямоугольник
1	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 0,$ $\delta\varphi = 0.$	$q, \text{МэВ}^{-2}$	$0,466 \pm 0,009$	$0,500 \pm 0,009$	$0,576 \pm 0,140$
	$\delta q, \%$	1,9	1,8	24
	$\Delta_3, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,03$	$3,34 \pm 0,03$	$3,12 \pm 0,38$
	$\Delta, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,03$	$3,46 \pm 0,03$	$4,58 \pm 0,56$
	$\delta\Delta_3 = \delta\Delta, \%$	0,9	0,9	12
	$\Omega$	3,52	20,2	230
	$M$	4	4	4
$\delta\varphi_0 = 5,$ $\delta\varphi = 10.$	$q, \text{МэВ}^{-2}$	$0,466 \pm 0,064$	$0,500 \pm 0,068$	$0,576 \pm 0,220$
	$\delta q, \%$	14	13,4	38
	$\Delta_3, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,24$	$3,34 \pm 0,23$	$3,12 \pm 0,60$
	$\Delta, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,24$	$3,48 \pm 0,22$	$4,58 \pm 0,87$
	$\delta\Delta_3 = \delta\Delta, \%$	7,0	6,7	19
	$\Omega$	0,172	0,51	20,6
	$M$	4	4	4
$\delta\varphi_0 = 5,$ $\delta\varphi = 40.$	$q, \text{МэВ}^{-2}$	$0,476 \pm 0,23$	$0,50 \pm 0,26$	$0,56 \pm 0,23$
	$\delta q, \%$	50	52	42
	$\Delta_3, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,86$	$3,34 \pm 0,87$	$3,17 \pm 0,67$
	$\Delta, \text{МэВ}$	$3,46 \pm 0,86$	$3,48 \pm 0,91$	$4,67 \pm 0,99$
	$\delta\Delta_3 = \delta\Delta, \%$	25	26	21
	$\Omega$	0,011	0,035	1,34
	$M$	4	4	4
	$q, \text{МэВ}^{-2}$	$0,47 \pm 0,47$	$0,50 \pm 0,39$	$0,56 \pm 0,38$

I	2	3	4	5			
	$\delta\varphi, \%$	100	78	68			
$\delta\varphi_0 = 5,$	$\Delta_{\rightarrow}, \text{МэВ}$	3,46	1,73	3,34	1,30	3,17	1,07
	$\Delta, \text{МэВ}$	3,46	1,73	3,48	1,35	4,67	1,57
$\delta\varphi = 20.$	$\delta\Delta_{\rightarrow} = \delta\Delta, \%$	50		39		34	
	$\Omega$	0,0028		0,0088		0,33	
	$M$	4		4		4	

В этих точках "вертикальная" погрешность  $\sigma_{\varphi}$  связана с "горизонтальной" погрешностью  $\sigma_r$  формулой

$$\sigma_r \approx |1/\varphi'| \sigma_{\varphi}$$

Погрешность разрешения, которая представляет собой отрезок, соединяющий две точки  $\varphi(E)$  при  $E = E_0 \pm \sqrt{2} \ln 2 \sigma$ , равна

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{2} \sigma_r.$$

А так как в точках  $E = E_0 \pm \sqrt{2} \ln 2 \sigma$   $|\varphi'| = 2,77 \varphi / \Delta$  то

$$\delta\Delta = \sigma_{\Delta} / \Delta = \sqrt{2} \sigma_{\varphi} / \Delta |\varphi'| = 0,51 \sigma_{\varphi} / \varphi = 0,51 \delta\varphi. \quad (II)$$

Из таблицы I видно, что вычисленные относительные погрешности  $\delta\Delta$  достаточно хорошо согласуются с простейшей прямой оценкой погрешностей по формуле (II). Это подтверждает корректность разработанного метода.

Тестовые спектры, вариант 2. В качестве входного  $\varphi_0(E)$  спектра был взят тот же спектр, что и в варианте I. В качестве выходного спектра  $\varphi(E)$  была взята функция, полученная интегрированием  $\varphi_0(E)$  о прямоугольной функцией отклика,  $\Delta_{\Pi} = 3,54$  МэВ (см. рис. 1, спектр № 2). Для этого спектра истинное значение  $\varphi_{\Pi} = 0,965$  МэВ<sup>-2</sup>,  $\Delta_{\rightarrow} = 2,40$  МэВ.

Спектры  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi(E)$  были векторизованы также, как в варианте I, с той же погрешностью считывания, равной 2% от среднего значения. Расчет был выполнен также для трех типов функций отклика: плотности нормального распределения, равнобедренного треугольника, прямоугольника. Результаты приведены в табл. 2.

При погрешностях в спектрах, равных ошибкам векторизации и считывания ( $\delta\varphi_0 = \delta\varphi = 0$ ), искомым типом функции отклика является прямоугольник,  $\Omega < \chi_M^2$ . Вычисленное значение  $\varphi = 1,012 \pm 0,016$

Таблица 2. Результаты расчета информационного качества  $\varphi$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_{\text{э}}$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  по тестовым спектрам (вариант 2).  $\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧФЧ.  $M = 3$ .

Дополнит. относитель- ные погреш- ности спек- тров $\delta\varphi$ , $\delta\varphi$	Наименование вычисленных величин	Типы функций отклика		
		Плотность нормального распредел.	Треугольник (равнобед- ренный)	Прямоугольник
1	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 0$ , $\delta\varphi = 0$ .	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$0,820 \pm 0,020$	$0,888 \pm 0,018$	$1,012 \pm 0,016$
	$\delta\varphi$ , %	2,4	2,0	1,6
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$2,600 \pm 0,030$	$2,500 \pm 0,025$	$2,350 \pm 0,018$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,600 \pm 0,030$	$2,600 \pm 0,026$	$3,440 \pm 0,025$
	$\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	1,2	1,0	0,8
	$\Omega$	35,0	8,6	6,67
$\delta\varphi_0 = 5\%$ , $\delta\varphi = 10\%$ .	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$0,82 \pm 0,15$	$0,89 \pm 0,14$	$1,01 \pm 0,11$
	$\delta\varphi$ , %	18	15	11
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 0,23$	$2,50 \pm 0,19$	$2,35 \pm 0,13$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 0,23$	$2,60 \pm 0,20$	$3,44 \pm 0,19$
	$\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	9	7,6	5,5
	$\Omega$	0,8	3,11	0,158
$\delta\varphi_0 = 5\%$ , $\delta\varphi = 40\%$ .	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$0,82 \pm 0,56$	$0,89 \pm 0,62$	$1,01 \pm 0,58$
	$\delta\varphi$ , %	66	70	58
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 0,86$	$2,50 \pm 0,86$	$2,35 \pm 0,67$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 0,86$	$2,60 \pm 0,90$	$3,44 \pm 0,98$
	$\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	33	35	29
	$\Omega$	0,058	0,015	0,011
$\delta\varphi_0 = 5\%$ , $\delta\varphi = 80\%$ .	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$0,82 \pm 1,10$	$0,89 \pm 1,03$	$1,01 \pm 1,05$
	$\delta\varphi$ , %	134	116	104
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 1,72$	$2,50 \pm 1,43$	$2,35 \pm 1,22$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,60 \pm 1,72$	$2,60 \pm 1,49$	$3,44 \pm 1,80$
	$\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	67	58	52
	$\Omega$	0,0145	0,0037	0,0027

практически совпадает в пределах погрешности с истинным  $q_n = 0,955$ . Для двух других функций отклика  $\Omega > \chi_M^2$ .

При увеличении погрешности в спектрах, начиная с  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 10\%$ , для всех трех типов функций отклика  $\Omega < \chi_M^2$ , т.е. все три типа допустимы. Вычисленные значения  $q$  и  $\Delta_3$  совпадают для всех трех типов функций отклика в пределах статистических погрешностей.

Тестовые спектры, вариант 3. Чтобы испытать, как работает метод для участка спектра, были проведены вычисления  $q$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta$  для тестовых спектров, заданных также как и в варианте I, но "обрезанных" слева в точке  $E = 5,5$  МэВ. Спектры  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi(E)$  в области  $E < 5,5$  МэВ считались неизвестными. На рис. I они изображены штриховыми линиями, точка "обреза"  $E = 5,5$  МэВ показана вертикальной стрелкой.

Выходной спектр  $\varphi(E)$  (функция отклика - плотность нормального распределения) был достроен в области среза с помощью алгоритма 3, изложенного в разделе I (на рис. I спектр 3).

Обозначим  $\Delta_K$   $K$ -е приближение искомого эквивалентного разрешения,  $\Delta_{CK}$  - соответствующее  $\Delta_K$  разрешение, по которому достраивается спектр  $\varphi(E)$  вблизи границы среза.  $\Delta_{CK}$  может принимать значения только кратные ширине интервала векторизации 0,5 МэВ. Для спектра  $\varphi(E)$  цепочка поиска оптимального  $\Delta$  выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= 2,2, \quad \Delta_{0C} = 2,0; \quad \Delta_1 = 3,3, \quad \Delta_{1C} = 3,5; \\ \Delta_2 &= 5,0, \quad \Delta_{2C} = 5,0; \quad \Delta_3 = 4,15, \quad \Delta_{3C} = 4; \\ \Delta_4 &= 3,7, \quad \Delta_{4C} = 3,5; \quad \Delta_5 = 3,5, \quad \Delta_{5C} = 3,5. \end{aligned}$$

Искомое  $\Delta = 3,5$  МэВ. Алгоритм обладает быстрой сходимостью. На рис. I показан достроенный вблизи среза выходной спектр  $\varphi_c(E)$  (спектр 4).

Результаты расчета  $q$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta$  приведены в таблице 3. Погрешности векторизации и считывания также равны 2% от среднего значения спектров. При уровнях погрешностей спектров  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,

$\delta\varphi = 10\%$  соотношению  $\Omega \leq \chi_M^2$  удовлетворяют функции отклика типа плотности нормального распределения и треугольник. Все три функции отклика удовлетворяют соотношению  $\Omega \leq \chi_M^2$  при уровнях погрешностей  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 40\%$ . Отклонения  $q$  и  $\Delta_3$  от их истинных значений находятся в пределах статистических погрешностей.

Таким образом, несмотря на большую потерю информации о спектрах

Таблица 3. Результаты расчета информационного качества  $q$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_{\approx}$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  по тестовым спектрам, "отрезанным" слева в точке  $E = 5,5$  МэВ (вариант 3).

$\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧО,  $M = 3$ .

Дополнит. относитель- ные погреш- ности спек- тров $\delta\varphi_0, \delta\varphi$	: Наименование : вычисленных : величин	: Типы функций отклика		
		: Плотность : нормального : распредел.	: Треугольник : (равнобед- : ренный)	: Прямоугольник
I	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 0,$ $\delta\varphi = 0.$	$q, \text{ МэВ}^{-2}$	$0,439 \pm 0,066$	$0,482 \pm 0,006$	$0,266 \pm 0,006$
	$\delta q, \%$	1,4	1,2	2,2
	$\Delta_{\approx}, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,02$	$3,40 \pm 0,02$	$3,11 \pm 0,03$
	$\Delta, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,02$	$3,55 \pm 0,02$	$4,58 \pm 0,05$
	$\delta\Delta_{\approx} = \delta\Delta, \%$	0,7	0,6	1,1
	$\Omega$	40,1	4,49	360
$\delta\varphi_0 = 5\%,$ $\delta\varphi = 10\%.$	$q, \text{ МэВ}^{-2}$	$0,439 \pm 0,039$	$0,482 \pm 0,038$	$0,266 \pm 0,016$
	$\delta q, \%$	8,8	7,8	5,8
	$\Delta_{\approx}, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,16$	$3,40 \pm 0,19$	$3,11 \pm 0,09$
	$\Delta, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,16$	$3,55 \pm 0,14$	$4,58 \pm 0,13$
	$\delta\Delta_{\approx} = \delta\Delta, \%$	4,4	3,9	2,9
	$\Omega$	0,94	0,11	8,53
$\delta\varphi_0 = 5\%,$ $\delta\varphi = 40\%.$	$q, \text{ МэВ}^{-2}$	$0,44 \pm 0,14$	$0,48 \pm 0,14$	$0,266 \pm 0,075$
	$\delta q, \%$	32	28	28
	$\Delta_{\approx}, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,58$	$3,40 \pm 0,48$	$3,11 \pm 0,42$
	$\Delta, \text{ МэВ}$	$3,56 \pm 0,58$	$3,55 \pm 0,50$	$4,58 \pm 0,63$
	$\delta\Delta_{\approx} = \delta\Delta, \%$	16	14	14
	$\Omega$	0,065	0,007	0,57

(отрезана почти половина спектров левее точки  $E = 5,5$  МэВ) метод дает правильную оценку  $q$  и  $\Delta$  с хорошей точностью.

Тестовые спектры, вариант 4. В качестве тестового спектра  $\varphi_0(E)$  и спектра  $\varphi(E)$  взяты те же спектры, что и в варианте 2, но "отрезанные" слева в точке  $E = 5,5$  МэВ. На рис. 1 они изображены штриховыми линиями в области энергий  $E < 5,5$  МэВ.

Выходной спектр  $\varphi(E)$  (функция отклика - прямоугольник) был построен в области среза с помощью алгоритма 3 из раздела I (на рис. 1 спектр 2). Однако достройка спектра  $\varphi(E)$  производилась в предположении, что спектрометрическая система имеет функцию отклика типа плотности нормального распределения (спектр 5 на рис. 1).

Цепочка поиска оптимального  $\Delta$  для достройки спектра  $\varphi(E)$  имеет следующий вид (обозначения такие же, как и в варианте 3):

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= 1,7, \quad \Delta_{0c} = 1,5; & \Delta_1 &= 2,6, \quad \Delta_{1c} = 2,5; \\ \Delta_2 &= 2,1, \quad \Delta_{2c} = 2,0; & \Delta_3 &= 1,9, \quad \Delta_{3c} = 2,0; \\ \Delta_4 &= 2,0, \quad \Delta_{4c} = 2,0. \end{aligned}$$

Искомое  $\Delta_3 = 2,0$ . Истинное значение  $\Delta_3 = 2,4$  МэВ. Так как длина интервала векторизации равна 0,5 МэВ, то ближайшими к истинному  $\Delta_3$  значениями искомого  $\Delta_3$  являются  $\Delta_3 = 2,0$  МэВ и  $\Delta_3 = 2,5$  МэВ.  $\Delta_3$  для построения сглаженных значений спектра вблизи среза найдено с вполне допустимой погрешностью менее одной длины интервала векторизации. Оптимальным для  $\Delta_3$  является значение 2,5 МэВ. Отклонение от оптимального объясняется тем, что достройка спектра вблизи среза происходила не с прямоугольной функцией отклика, а с функцией отклика типа плотности нормального распределения, причем достроенная часть составляла около 50 % всей области значимых значений спектра  $\varphi(E)$  (см. рис. 1).

Результаты расчета  $q$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta$  приведены в табл. 4. Погрешности векторизации и считывания равны 2 % от среднего значения спектров.

При уровне погрешностей спектров  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 10\%$  и  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 40\%$  соотношение  $\Omega < \gamma_n^2$  выполняется для всех трех типов функций отклика. Отклонения вычисленных значений  $q$  и  $\Delta$  от их истинных значений  $q_n = 0,965$  МэВ<sup>-2</sup> и  $\Delta_n = 2,40$  МэВ находятся в пределах статистических погрешностей.

Реальные погрешности спектров  $\varphi_0(E)$  и  $\varphi(E)$  близки к ошибкам векторизации и считывания. При таком уровне погрешностей ( $\delta\varphi_0 = 0$ ,



Таблица 4. Результаты расчета информационного качества  $\varphi$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_{\varphi}$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  по тестовым спектрам, "отрезанным" слева в точке  $E = 5,5$  МэВ (вариант 4).  
 $\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧФФ.  $M = 3$ .

Дополнит. относит. погрешности спектров $\delta\varphi_0, \delta\varphi$	Наименование вычисленных величин	Типы функций отклика		
		Плотность нормального распредел.	Треугольник (равнобедренный)	Прямоугольник
I	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 0,$ $\delta\varphi = 0.$	$\varphi$ , МэВ <sup>-2</sup>	$1,16 \pm 0,02$	$1,23 \pm 0,03$	$1,33 \pm 0,02$
	$\delta\varphi$ , %	2,0	2,0	1,6
	$\Delta_{\varphi}$ , МэВ	$2,19 \pm 0,02$	$2,13 \pm 0,02$	$2,04 \pm 0,02$
	$\Delta$ , МэВ	$2,19 \pm 0,02$	$2,22 \pm 0,02$	$3,00 \pm 0,02$
	$\delta\Delta_{\varphi} = \delta\Delta$ , %	1,0	1,0	0,8
	$\Omega$	52,9	47,9	90,3
$\delta\varphi_0 = 5\%,$ $\delta\varphi = 10\%$	$\varphi$ , МэВ <sup>-2</sup>	$1,16 \pm 0,16$	$1,23 \pm 0,15$	$1,33 \pm 0,13$
	$\delta\varphi$ , %	14	12	11
	$\Delta_{\varphi}$ , МэВ	$2,19 \pm 0,15$	$2,13 \pm 0,13$	$2,04 \pm 0,11$
	$\Delta$ , МэВ	$2,19 \pm 0,15$	$2,22 \pm 0,14$	$3,00 \pm 0,16$
	$\delta\Delta_{\varphi} = \delta\Delta$ , %	7,0	6,1	5,3
	$\Omega$	1,25	1,06	2,01
$\delta\varphi_0 = 5\%,$ $\delta\varphi = 40\%$	$\varphi$ , МэВ <sup>-2</sup>	$1,16 \pm 0,72$	$1,23 \pm 0,75$	$1,33 \pm 0,61$
	$\delta\varphi$ , %	62	62	46
	$\Delta_{\varphi}$ , МэВ	$2,19 \pm 0,68$	$2,13 \pm 0,65$	$2,04 \pm 0,47$
	$\Delta$ , МэВ	$2,19 \pm 0,68$	$2,22 \pm 0,68$	$3,00 \pm 0,69$
	$\delta\Delta_{\varphi} = \delta\Delta$ , %	31	31	23
	$\Omega$	0,08	0,07	0,212

$\delta \varphi = 0$ ) должно выполняться соотношение  $\Omega \leq \chi_m^2$  для функции отклика, одинаковой с истинной. Это не происходит, по-видимому, из-за того, что достроенная часть спектра  $\varphi(E)$  получена с разрешением, отличающимся от разрешения исходного спектра  $\varphi_0(E)$  на величину 0,4 МэВ, и с функцией отклика, также отличающейся от истинной.

Результаты апробации метода частотного анализа на четырех вариантах тестовых спектров позволяют сделать вывод, что этот метод дает правильные оценки  $q$ ,  $\Delta q$  и  $\Delta$ , в том числе и для участка пары спектров  $\varphi_0(E)$ ,  $\varphi(E)$ .

Оценка информационного качества реальной спектрометрической системы. Спектр радионуклидного источника  $^{233}\text{Pu}-\beta$ . Нейтронный спектр радионуклидного источника  $^{233}\text{Pu}-\beta$  был измерен сцинтилляционным спектрометром с кристаллом стильбена, абсолютное разрешение  $\Delta = 0,1 - 0,2$  МэВ для энергий нейтронов 1 МэВ и  $\Delta = 0,2 - 0,4$  МэВ для энергий нейтронов 4 МэВ. Средняя величина абсолютного разрешения по всему спектру составляла 0,15 - 0,30 МэВ.

Этот же спектр был измерен методом шаровых замедлителей (мультиферным спектрометром) [3]. Мультиферный спектрометр состоял из пяти полиэтиленовых шаровых замедлителей диаметрами 5,27 см, 7,62 см, 12,70 см, 20,30 см, 30,50 см. Детектором тепловых нейтронов служил полупроводниковый счетчик ДТН - 1.

На рис. 2 а показаны спектры  $^{233}\text{Pu}-\beta$ , измеренные двумя спектрометрами. Спектр, полученный с помощью мультиферного спектрометра, изображен в виде штриховой гистограммы. Для проведения вычислений методом частотного анализа по гистограмме была построена плавная кривая (кривая 2 на рис. 2 а).

Входным спектром  $\varphi_0(E)$  считали спектр, измеренный сцинтилляционным спектрометром. Выходным  $\varphi(E)$  - измеренный мультиферным спектрометром. Спектры были векторизованы с шагом, равным 0,1 МэВ (длина интервала векторизации). Так как спектр  $\varphi_0(E)$  измерен с энергетическим порогом 0,4 МэВ, то в точке  $E = 0,4$  МэВ спектры считали "срезанными". Для достройки спектра  $\varphi(E)$  в районе среза был применен алгоритм 3 из раздела 1 и функция отклика типа плотности нормального распределения. Погрешности векторизации и считывания были взяты равными 2 % от средних значений спектров.

Результаты вычислений приведены в табл. 5. При уровне погреш-

Таблица 5. Результаты расчета информационного качества  $\varphi$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_{\text{э}}$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  для спектра радионуклидного источника  $^{232}\text{Pu} - \text{B}$ , измеренного мультисферным спектрометром.  $\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧЭО.  $M = 4$ .

Дополнит. относит. погрешности спектров $\delta\varphi_0, \delta\varphi$	Наименование вычисленных величин	Типы функций отклика		
		Плотность нормального распредел.	Треугольник (равнобедренный)	Прямоугольник
1	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 10\%$	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$2,88 \pm 0,26$	$2,80 \pm 0,35$	$3,37 \pm 0,50$
	$\delta\varphi$ , %	9,0	12,4	15,0
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,06$	$1,41 \pm 0,09$	$1,29 \pm 0,10$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,06$	$1,47 \pm 0,09$	$1,89 \pm 0,14$
	$\delta\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	4,5	6,2	7,5
	$\Omega$	9,37	11,6	23,6
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 40\%$	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$2,88 \pm 0,98$	$2,80 \pm 0,59$	$3,37 \pm 1,95$
	$\delta\varphi$ , %	34	21	58
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,23$	$1,41 \pm 0,15$	$1,29 \pm 0,37$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,23$	$1,47 \pm 0,16$	$1,89 \pm 0,55$
	$\delta\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	17	11	29
	$\Omega$	0,62	0,77	1,58
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 80\%$	$\varphi$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$2,88 \pm 1,93$	$2,80 \pm 2,30$	$3,47 \pm 2,50$
	$\delta\varphi$ , %	67	82	72
	$\Delta_{\text{э}}$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,47$	$1,41 \pm 0,59$	$1,29 \pm 0,47$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$1,39 \pm 0,47$	$1,47 \pm 0,62$	$1,89 \pm 0,69$
	$\delta\Delta_{\text{э}} = \delta\Delta$ , %	34	42	36
	$\Omega$	0,16	0,19	0,40

ностей  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 10\%$  экспериментальным данным соответствует функция отклика типа плотности нормального распределения.

Реальные погрешности спектров близки к  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 40\%$ . В этом случае все три функции отклика одинаково хорошо моделируют исследуемую спектрометрическую систему.

Так как разрешение, полученное с помощью сцинтилляционного спектрометра значительно меньше разрешения, полученного с помощью мультисферного спектрометра, то можно считать, что спектр  $\varphi_0(E)$  - истинный спектр источника  $^{252}\text{Cf}$ . Тогда информационное качество мультисферного спектрометра для данного вида спектра равно  $2,9 \pm 1,0 \text{ МэВ}^{-2}$ , абсолютное эквивалентное разрешение -  $1,4 \pm 0,2 \text{ МэВ}$ .

На рис. 2 а  $\Delta_3$  показано отрезком, достроенная часть спектра  $\varphi(E)$  левее точки  $E = 0,4 \text{ МэВ}$  изображена штриховой кривой.

Оценка информационного качества реальной спектрометрической системы. Спектр радионуклидного источника  $^{252}\text{Cf}$ . Нейтронный спектр радионуклидного источника  $^{252}\text{Cf}$  был измерен теми же спектрометрами, что и в предыдущем пункте. На рис. 2 б достроенная часть спектра  $\varphi(E)$  в районе среза  $E = 0,4 \text{ МэВ}$  изображена штриховой линией. Векторизация спектров была выполнена с шагом (интервалом)  $0,2 \text{ МэВ}$ . Погрешности векторизации и считывания были взяты равными  $2\%$  от среднего значения спектров.

Результаты вычислений приведены в табл. 6. При уровне погрешностей  $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 10\%$  экспериментальные данные соответствуют функциям отклика типа плотности нормального распределения и равнобедренного треугольника.

Для реальных погрешностей спектров ( $\delta\varphi_0 = 5\%$ ,  $\delta\varphi = 40\%$ ) все три функции отклика одинаково хорошо моделируют исследуемую спектрометрическую систему.

Информационное качество и эквивалентное разрешение мультисферного спектрометра для данного вида спектра равны:

$q = 1,1 \pm 0,4 \text{ МэВ}^{-2}$ ,  $\Delta_3 = 2,5 \pm 0,4 \text{ МэВ}$ . На рис. 2 б величина  $\Delta_3$  показана отрезком.

Таблица 6. Результаты расчета информационного качества  $q$ , абсолютного эквивалентного разрешения  $\Delta_{\approx}$ , абсолютного разрешения  $\Delta$  для спектра радионуклидного источника  $^{252}\text{Cf}$ , измеренного мультисферным спектрометром.  $\Omega$  - нормированная сумма произведений отклонений ЧФО.  $M = 4$ .

Дополнит. относит. погрешности спектров $\delta\varphi_0, \delta\varphi$	Наименование вычисленных величин	Типы функций отклика		
		Плотность нормального распредел.	Треугольник (равнобедренный)	Прямоугольник
I	2	3	4	5
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 10\%$	$q$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$1,09 \pm 0,09$	$1,02 \pm 0,10$	$1,17 \pm 0,25$
	$\delta q$ , %	8,4	9,8	21
	$\Delta_{\approx}$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,10$	$2,34 \pm 0,11$	$2,18 \pm 0,23$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,10$	$2,44 \pm 0,12$	$3,17 \pm 0,33$
	$\Delta_{\approx} = \delta \Delta$ , %	4,2	4,9	10,5
	$\Omega$	1,08	0,62	14,6
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 40\%$	$q$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$1,09 \pm 0,35$	$1,02 \pm 0,43$	$1,17 \pm 0,42$
	$\delta q$ , %	32	42	36
	$\Delta_{\approx}$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,38$	$2,34 \pm 0,50$	$2,18 \pm 0,39$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,38$	$2,44 \pm 0,52$	$3,17 \pm 0,57$
	$\Delta_{\approx} = \delta \Delta$ , %	16	21	18
	$\Omega$	0,079	0,041	0,95
$\delta\varphi_0 = 5\%$ $\delta\varphi = 80\%$	$q$ , $\text{МэВ}^{-2}$	$1,09 \pm 0,68$	$1,02 \pm 0,63$	$1,17 \pm 0,58$
	$\delta q$ , %	62	62	50
	$\Delta_{\approx}$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,76$	$2,34 \pm 0,73$	$2,18 \pm 0,53$
	$\Delta$ , $\text{МэВ}$	$2,46 \pm 0,76$	$2,44 \pm 0,77$	$3,17 \pm 0,78$
	$\Delta_{\approx} = \delta \Delta$ , %	31	31	25
	$\Omega$	0,02	0,01	0,24

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны способы и принципиальные алгоритмы оценки информационного качества  $\mathcal{Q}$  и абсолютного разрешения  $\Delta$  методом частотного анализа на произвольно выделенном участке внутри области определения пары спектров  $\varphi_0(\varepsilon)$ ,  $\varphi(\varepsilon)$ .

2. Метод частотного анализа был апробирован на ряде тестовых и реальных спектров. Полученные результаты подтверждают работоспособность метода и позволяют сделать некоторые предварительные выводы:

1) Если условные спектрометры с различными функциями отклика, которые моделируют реальную спектрометрическую систему, удовлетворяют паре спектров  $\varphi_0(\varepsilon)$ ,  $\varphi(\varepsilon)$ , то вычисленные значения  $\mathcal{Q}$  и  $\Delta$ , как правило, совпадают в пределах статистических погрешностей.

2) Наиболее простой в вычислительном плане является оценка  $\mathcal{Q}$  и  $\Delta$ , при помощи условного спектрометра с функцией отклика типа плотности нормального распределения. Поэтому такой спектрометр является предпочтительным для моделирования реальных спектрометрических систем.

3) Так как функции отклика типа плотности нормального распределения и равнобедренного треугольника близки по форме, то условные спектрометры с этими функциями отклика различаются при очень малых погрешностях спектров  $\delta\varphi_0$  и  $\delta\varphi$ , приблизительно равных ошибкам векторизации и считывания (2%). Реальные статистические погрешности  $\delta\varphi_0$  и  $\delta\varphi$  обычно значительно больше 2%, поэтому эти условные спектрометры практически эквивалентны. По причинам, изложенным в пункте 2), предпочтительнее условный спектрометр с функцией отклика типа плотности нормального распределения.

4) Возможность различимости условных спектрометров с разными функциями отклика зависит не только от формы спектров  $\varphi_0(\varepsilon)$ ,  $\varphi(\varepsilon)$ , но также в значительной степени от величины статистических погрешностей спектров. Например, для рассмотренных в разделе 2 спектров условные спектрометры с функциями отклика типа плотности нормального распределения и прямоугольника еще различимы при уровне погрешностей спектров 10%, при уровне 40% они эквивалентны.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Семенов В.П., Триков Л.А. Разрешение спектрометрических систем различных типов. Постановка проблемы. Препринт ФЭИ - 1632. Обнинск, 1984.

2. Семенов В.П., Триков Л.А. Метод оценки информационного качества и разрешения спектрометрических систем. Препринт ФЭИ - 2112. Обнинск, 1990.

3. Семенов В.П., Триков Л.А. Некоторые аспекты развития мультисферного метода спектрометрии нейтронов. / Радиационная безопасность и защита АЭС. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 4. С. 120-133.

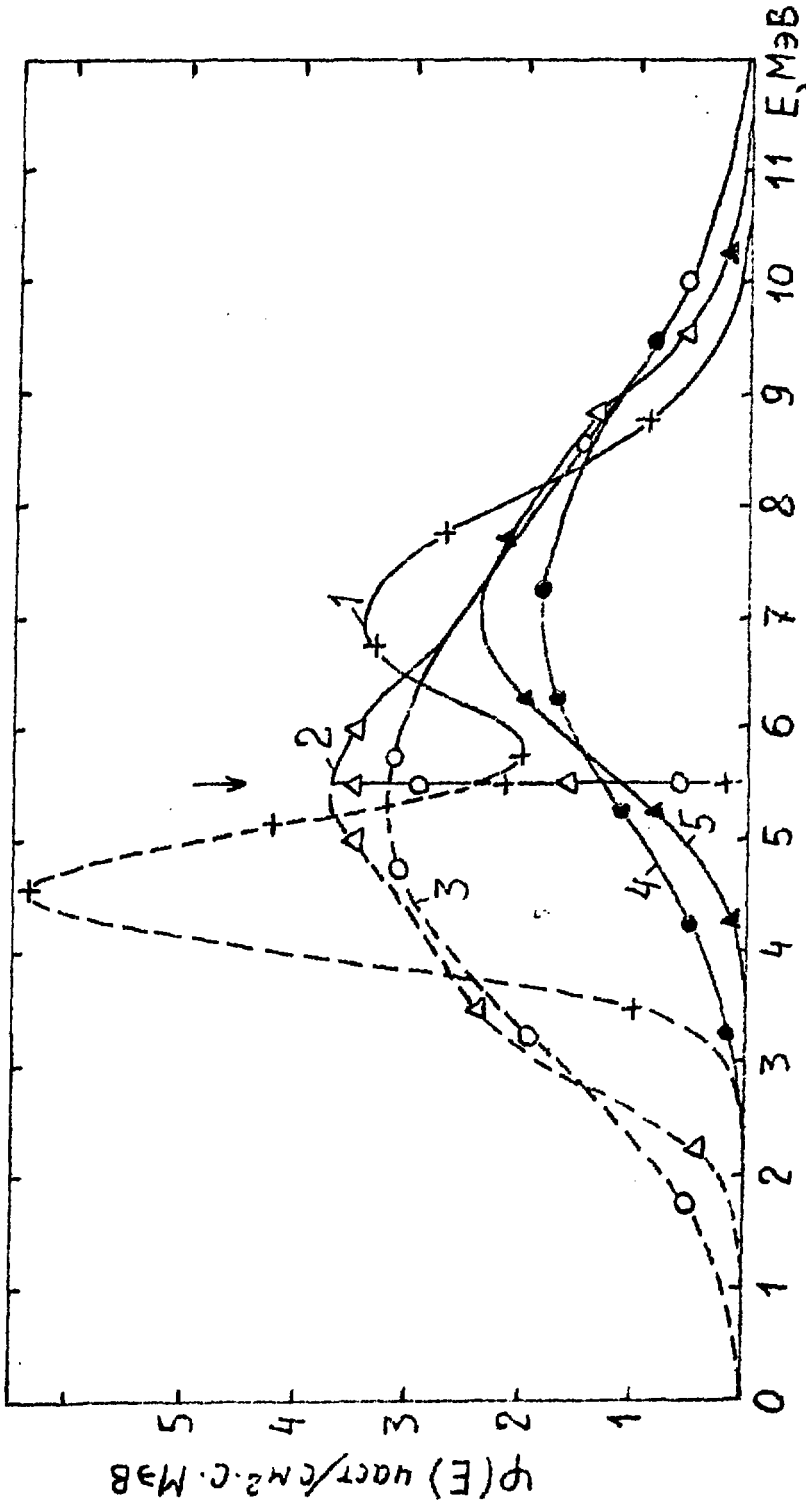


Рис. 1. Тестовые спектры. 1 - входной спектр  $\varphi_0(E)$ . 2 - входной спектр  $\varphi(E)$ , полученный спектрометром с прямоугольной функцией отклика,  $\Delta = 7,08$  МэВ. 3 - выходной спектр  $\varphi(E)$ , полученный спектрометром с функцией отклика типа плотности вероятности нормального распределения,  $\Delta = 7,08$  МэВ. 4 - спектр № 3, сглаженный на границе "среза". 5 - спектр № 2, сглаженный на границе "среза". Штриховые кривые - "срезанные" части спектров № 1, 2, 3. Стрелкой обозначена граница "среза",  $E = 5,5$  МэВ.



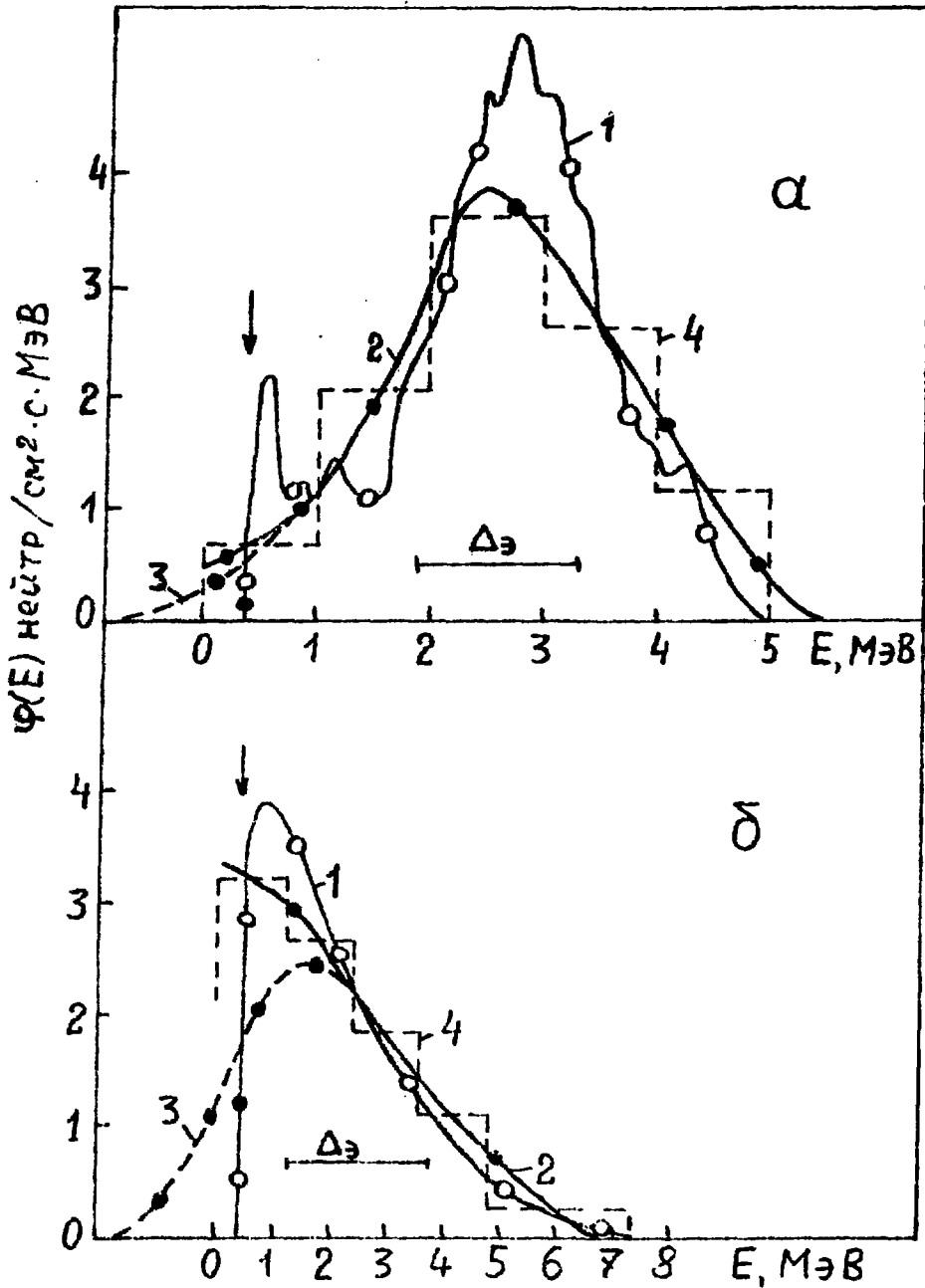


Рис. 2. Спектры радионуклидных источников  $^{238}\text{Pu-B}$  (а) и  $^{252}\text{Cf}$  (б), измеренные спектрометрами: 1 - на основе стильбена, 2 и 4 - мультисферным, 3 - сглаженный вблизи "среза" спектр № 2.

Технический редактор **Н. П. Герасимова**

---

Подписано к печати 17.07.1990 г.      ТБ-03406      Бумага писчая № 1  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>      Усл. п. л. 1,5      Уч.-изд. л. 1      Тираж 80 экз.  
Цена 20 коп.      Индекс 3624      ФЭИ-2118

---

Отпечатано на ротапринте.  
249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ

**20 коп.**

**Индекс 3624**

**Сценка информационного качества и разрешения спектрометрических систем методом частотного анализа. Результаты апробации.**

**ФЗИ-2118, 1990, 1-24.**