

На правах рукописи

МАРЦИНОВСКИЙ Иван Артемьевич

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВЫСОКОДИСПЕРСИОННЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ**

01.04.04. – «Физическая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Голиков Юрий Константинович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Санин Андрей Леонардович,**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Фишкова Татьяна Яковлевна**

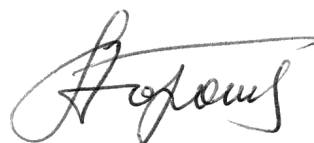
Ведущая организация: **Институт аналитического приборостроения  
РАН**

Защита состоится \_\_22\_декабря\_2011\_\_ в \_16\_30\_ на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 2 учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.229.01,  
доктор технических наук, профессор



Коротков А. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Точное измерение электронных спектров было, остается и, наверное, останется на долгие годы одной из самых актуальных проблем электронной спектроскопии. Уровень требований к разрешению электронных спектрометров постоянно растет, но старый парк традиционных систем с трудом справляется с новыми задачами, особенно, если учесть современную тенденцию к неразрушающим способам возбуждения вещества и использованию малых доз облучения. Усовершенствование систем энергоанализа идет по двум направлениям. Во-первых, предлагаются все новые и новые схемы электронно-оптических приборов с высоким разрешением и большой светосилой. Здесь есть серьезные наработки у нас в стране и за рубежом. Во-вторых, развивается математическая идеология обработки выходных сигналов, снятых экспериментально таким образом, чтобы точно реконструировать реальный энергетический спектр исследуемого источника (или процесса). Это перспективное направление пока еще весьма слабо развито по вполне принципиальным причинам. До сих пор не установлена точная форма интегральной связи выходного тока электрических спектрометров и реального энергетического спектра для различных источников и систем энергоанализа. Описанные в литературе варианты не вполне адекватны природе вещей и нуждаются в серьезном исследовании, так как при анализе обнаруживается логическое несоответствие принципам аналитической динамики частиц в электрических полях. Кроме того, еще не освоена математическая техника решения подобных интегральных уравнений, ни аналитическими, ни численными способами. Существует ряд разрозненных приёмов, но, в целом, эффективных методик еще не построено. И наконец, для реализации планов математической обработки сигналов, снятых с электронного спектрометра,

нужны особые виды высокодисперсионных электродных конфигураций, в которых можно значительно подавить шумы и потоки случайных рассеянных электронов.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Диссертационная работа посвящена теории электронных спектрометров, физическим процессам, происходящим внутри них, способам синтеза и общей идеологии обработки выходных сигналов, позволяющей реконструировать реальные измеряемые спектры с высокой точностью.

Основные задачи.

1. Вывод интегрального соотношения связи измеряемого выходного тока и истинного электронного энергетического спектра для различных конфигураций источников и электронных энергоанализаторов, работающих в режиме неподвижных траекторий.
2. Вычисление аппаратной функции для энергоанализаторов известных типов.
3. Разработка алгоритмов решения основного интегрального соотношения и решение тестовых задач.
4. Разработка теории некоторых высокодисперсионных систем энергоанализа с плоскостью симметрии с разделением переменных в уравнениях движения.

**Научная новизна.** Все результаты, полученные в данной работе, являются новыми. Впервые выведена универсальная интегральная связь между выходным сигналом электронного спектрометра и истинным спектром исследуемого источника в виде интегрального уравнения Вольтерра I рода с аппаратной функцией в качестве ядра. При этом с помощью безразмерной модели движения частиц в полях доказано, что аппаратная функция обязательно имеет разрывной

характер и явно зависит от отношения: кинетическая энергия электрона, деленная на характерную потенциальную энергию поля, что соответствует потенциалу развертки. Вывод справедлив для электронных спектрометров с неподвижными («вмороженными») траекториями, когда электроны различных энергий от источника прогоняются последовательными группами по единому электронно-оптическому тракту с неизменными траекториями за счет изменения потенциала развертки. Для систем с предварительным постоянным торможением данный вывод не годится.

Разработана общая методика расчета аппаратной функции и на ее базе определены конкретные ее разновидности для различных видов известных энергоанализаторов при некоторых тестовых типах источников. Разработан ряд новых методов решения основного интегрального уравнения и проведены тестовые расчеты, подтверждающие их эффективность. Предложена и развита теория высокодисперсионных энергоанализаторов со скрещенными полями. Найден способ усовершенствования энергоанализаторов «Тутанхамон» и «Арка», связанный с небольшой деформацией электродов, повышающей линейную энергетическую дисперсию при сохранении габаритов систем.

Поставлена и решена задача восстановления энергетического и углового спектров в системе скрещенных однородных электрического и магнитного полей при варьировании напряженностей обоих полей.

**Научная и практическая значимость работы.** Полученные результаты имеют фундаментальный научный интерес для корпускулярной оптики, в частности, общая идеология расчета аппаратных функций. Разработанные алгоритмы восстановления спектров имеют большое практическое значение при работе с современными спектрометрами. Предложенные разновидности высокодисперсионных спектрометров имеют большое значение для практики научного приборостроения.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения.**

1. Между измеряемым сигналом электрического электронного спектрометра, работающего в режиме «замороженных траекторий», и реальным энергетическим спектром электронного источника существует однозначная связь в виде интегрального уравнения В. Вольтерра I рода с аппаратной функцией в качестве ядра. Аппаратная функция непрерывна, но имеет по производной разрывы I рода, она всегда состоит из нескольких фрагментов различных аналитических функций. Кроме того, аппаратная функция является функцией отношения  $\frac{\varepsilon}{qU}$ , где  $\varepsilon$  – начальная энергия электрона,  $U$  – потенциал развертки,  $q$  – заряд электрона.
2. Аппаратная функция высокодисперсионных энергоанализаторов «Тутанхамон», «Арка» вычисляется явно в элементарном виде.
3. Интегральное уравнение из пункта 1 может быть решено численным способом с точностью порядка 0,01%, что показано на тестовых примерах.
4. Класс скрещенных электрических полей с плоскостью симметрии  $y = 0$ , в которой ход потенциала распадается на сумму  $\varphi|_{y=0} = f(x) + p(y)$  обеспечивает запас энергетической дисперсии вдвое и выше превышающий известные анализаторы с рекордными параметрами: «Тутанхамон», «Арка» и «Квазикон», если взять  $f(x) = th^2\pi x$ , либо  $f(x) = 1 - e^{-\alpha x}$ , а  $p(y) = -ky$ ,  $k > 0$ .
5. В скрещенных однородных электрическом и магнитном полях можно анализировать потоки электронов одновременно по энергиям и углам влета с помощью вариации электрического и магнитного параметров.

Реальный спектр восстанавливается с помощью решения специального двумерного интегрального уравнения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на 8<sup>ом</sup> Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» 29–31 Мая 2007, Москва; XII Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» 14 Мая 2008, С.-Петербург; 9<sup>ом</sup> Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» 27 – 29 Мая 2009, Москва; 10<sup>ом</sup> Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» 24 – 26 Мая 2011, Москва.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах, из них 5 статей в (журналы входят в перечень ВАК) и 8 тезисов докладов.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты были получены автором лично под руководством научного руководителя.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из вводной части, 5-ти глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 167 страниц, включая 24 рисунка и 8 таблиц. Список литературы включает 111 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Кратко обоснована актуальность данной работы, ее значимость с научной и практической точек зрения, описаны поставленные цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1.** Работа в целом посвящена одному из направлений электронной оптики – энергоанализу, поэтому в первой главе дается краткий обзор развития

электроннооптических систем, более подробно рассматриваются существующие на сегодняшний день энергоанализаторы, системы детектирования потоков частиц и математические методы обработки спектрометрических данных.

Обзор энергоанализаторов производится, в основном, с точки зрения анализа полевых конфигураций, используемых для разделения частиц.

В заключении на основе анализа имеющейся информации определяется круг неразрешенных на сегодняшний день проблем, связанных с обработкой спектрометрических данных в энергоанализаторах, решению которых и посвящена работа.

**Глава 2.** Далее используется безразмерная система координат; связь между физическими координатами  $X, Y, Z$ , временем  $t$  и соответствующими им безразмерными  $x, y, z$  и  $\tau$  записывается в виде

$$X = lx, Y = ly, Z = lz, t = T\tau, \quad (1)$$

где  $l$  - характерный размер системы, а  $T = l \sqrt{\frac{m}{|q\Phi_0|}}$  - характерное время. Отсюда

можно получить связь  $\Phi = \Phi_0 \varphi(x, y, z) + \Phi_1$  безразмерного  $\varphi(x, y, z)$  и физического потенциала  $\Phi$  (константы  $\Phi_0$  и  $\Phi_1$  имеют размерность электрического

потенциала), скоростей  $\dot{x} = \frac{T}{l} \dot{X}$ ,  $\dot{y} = \frac{T}{l} \dot{Y}$ ,  $\dot{z} = \frac{T}{l} \dot{Z}$ ; безразмерной  $W$  и физической

$\varepsilon$  энергий:  $W = \frac{\varepsilon}{|q\Phi_0|}$ . Здесь  $q$  - заряд частицы. Подробнее безразмерная система

координат описывается, например, в [1].

Анализ имеющихся работ, посвященных вопросам формирования тока на детекторе анализатора электростатического типа с траекториями движения, не зависящими от потенциала развертки, показал отсутствие единой теории, которой придерживались бы все авторы. Поэтому в данной главе вначале проводится теоретическое исследование связи функции эмиссии точечного



источника и тока на детекторе при помощи аппаратной функции  $A$ . Угловое и энергетическое распределения функции эмиссии должны быть независимы:

$$j = R(p, \theta) \cdot f(\varepsilon).$$

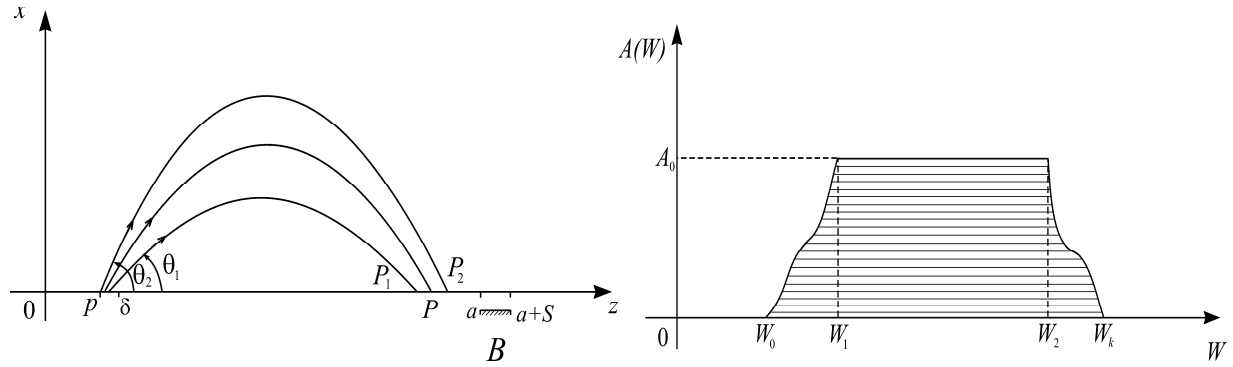


Рис.1. Свойства аппаратной функции на примере плоского зеркала а) – схема анализатора типа плоское зеркало; б) – зависимость тока частиц от энергии  $W$ .

Было рассмотрено движение частиц в плоскости под действием  $\varphi(x, z)$  (рис.1,а), когда ее можно рассматривать как основную плоскость двумерных полей,  $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$ , или меридиональной плоскостью осесимметричного поля.

Показано, что в общем случае ход аппаратной функции всегда разрывной и состоит, по крайней мере, из трех ненулевых фрагментов, что иллюстрирует рисунок 1,б. Если менять энергию настройки  $U$ , также будет меняться и  $W$ . На I участке ток на детектор постепенно возрастает, по мере того, как все большее число частиц «проваливается» на детектор. II участок соответствует условию, когда все частицы пучка полностью проходят через щель, III участок – спадание тока за счет выхода пятна засветки за пределы щели. Ширина горизонтального участка определяется соотношением размера пятна засветки и ширины щели  $S$ .

В результате получено общее выражение связи тока  $J(U)$  и  $f(\varepsilon)$  в виде

$$J(U) = \int_0^{\infty} A\left(\frac{\varepsilon}{qU}\right) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

и в развернутой форме, характеризующей раздельное интегрирование по трем областям (рис. 1, б):

$$J(U) = \int_{w_0 U}^{w_1 U} A_1 \left( \frac{\varepsilon}{qU} \right) f(\varepsilon) d\varepsilon + A_0 \int_{w_1 U}^{w_2 U} f(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{w_2 U}^{w_k U} A_2 \left( \frac{\varepsilon}{qU} \right) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

здесь  $p$  и  $\theta$  - соответственно, точка старта частицы и угол вылета,  $U = \Phi_0$  - потенциал развертки.

Полученные результаты были применены при нахождении аппаратной функции некоторых известных анализаторов: плоского зеркала, 180° сферического анализатора, цилиндрического и гиперболического зеркала с вводом пучка частиц параллельно оси симметрии, «Тутанхамона» и «Квазикона». Для «Тутанхамона» удалось получить выражение для аппаратной функции в явном виде через неполный эллиптический интеграл I рода  $F(\varphi, k)$  и II рода  $\Pi(\varphi, k, n)$ :

$$A(W) = za \cos \left[ \frac{z^2(W-1)}{W(z^2-1)} \right] - 2(W-1) \left[ \frac{(z^2 - 2z^2W + W)(W - z^2)}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ F \left( z \left[ \frac{2W-1}{W} \right]^{\frac{1}{2}}, \left[ \frac{1}{2W-1} \right]^{\frac{1}{2}} \right) \right. \\ \left. \Pi \left( z \left[ \frac{2W-1}{W} \right]^{\frac{1}{2}}, \left[ \frac{W}{2W-1} \right]^{\frac{1}{2}}, \left[ \frac{1}{2W-1} \right]^{\frac{1}{2}} \right) \left[ \frac{W}{(2W-1)(W^2 - 2W^2z^2 + 2z^4W - z^4)} \right]^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (4)$$

Для нахождения аппаратной функции тех анализаторов, в которых уравнения движения частиц не интегрируются аналитически, была разработана методика, основанная на прямом вычислении траекторий по дифференциальным уравнениям движения. Сравнение аппаратной функции одного и того же анализатора, рассчитанной аналитически и численно, показало высокую степень точности численного расчета.

Вычисленные аппаратные функции использовались при численном моделировании восстановления энергетического спектра, результаты которого приводятся в следующей главе.

Результаты, приведенные в данной главе, опубликованы в [A1, A2].

**Глава 3.** Связь тока и функции эмиссии (2) позволяет, в принципе, восстанавливать точную форму энергетического спектра по известным значениям  $J(U)$ . В этой главе предлагаются методы восстановления энергетического спектра и исследуется их практическая применимость.

Выражение (2) заменой переменных  $\varepsilon = e^\beta$ ,  $qU = e^\gamma$  можно привести к

$$J(\gamma) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} K'(\gamma - \beta) p(e^\beta) e^\beta d\beta, \quad (5)$$

когда оно имеет вид свертки. После этого (5) можно решать одним из многочисленных методов деконволюции.

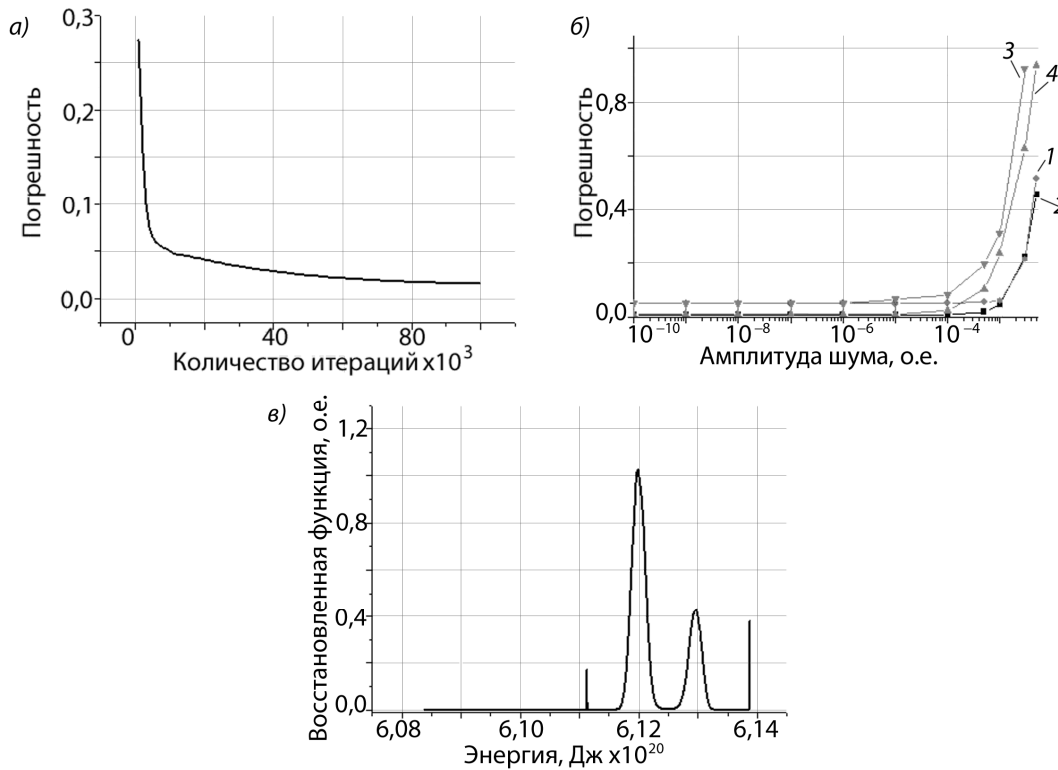


Рис.2. Процедура восстановления энергетического спектра на основе входных данных, содержащих шумы; зависимости максимальной погрешности восстановления от количества итераций (а) и от амплитуды шумов (б). Рассмотрены модели энергоанализаторов: плоского зеркала (1,3) и сферического (2,4); алгоритмы Голда (1,2) и Люси – Ричардсона (3,4). в) – восстановленный спектр с артефактами, появление которых связано с шумами во входных данных,  $\eta_A = 1,0 \cdot 10^3$ .

В данной работе была исследована применимость нескольких алгоритмов деконволюции для решения задачи восстановления спектра: алгоритма Голда с БПФ оптимизацией, классический алгоритм Джанссона, алгоритм Люси-Ричардсона, алгоритм Ван-Циттера с реблюрингом, Ван-Циттера с реблюрингом в положительной области. Исследовалось влияние уровня шума во входном сигнале на точность восстановления спектра и время выполнения. Зависимость точности восстановления от уровня шума приведена на рис.2. Лучшие результаты с точки зрения точности и скорости вычислений продемонстрировали методы Голда с БПФ оптимизацией и Люси-Ричардсона, поэтому в дальнейшем именно они использовались для восстановления энергетических спектров.

Проведена количественная оценка повышения разрешающей способности анализатора на модельных спектрах. Для этого рассматриваются две разные ситуации: на рис.3, б и в представлены токи и спектры, соответствующие двум предельным случаям в отношении разрешения пиков на полувысоте. В первом случае пики расположены максимально близко для их разрешения без математической обработки с соответствующими параметрами функции распределения. Во втором – максимально близко для их разрешения после деконволюции.

Для исследованной электродной конфигурации при уровне точности восстановления  $\rho_n \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$  повышение разрешающей способности составило  $\Delta\varepsilon_1/\Delta\varepsilon_2 = 5,79$ . Величина  $\Delta\varepsilon_1/\Delta\varepsilon_2$  зависит непосредственно от величин ширины входной и выходной щелей, а также от некоторых других характеристик прибора, уровня шума во входных данных, погрешности восстановления, алгоритма и т.д. Например, повысив точность восстановления при тех же условиях до  $\rho_n \leq 8,0 \cdot 10^{-4}$ , мы получим  $\Delta\varepsilon_1/\Delta\varepsilon_2 = 10,69$ , что соответствует

повышению разрешающей способности более чем на порядок (соотв. ток и спектры приведены на рис.3, г).

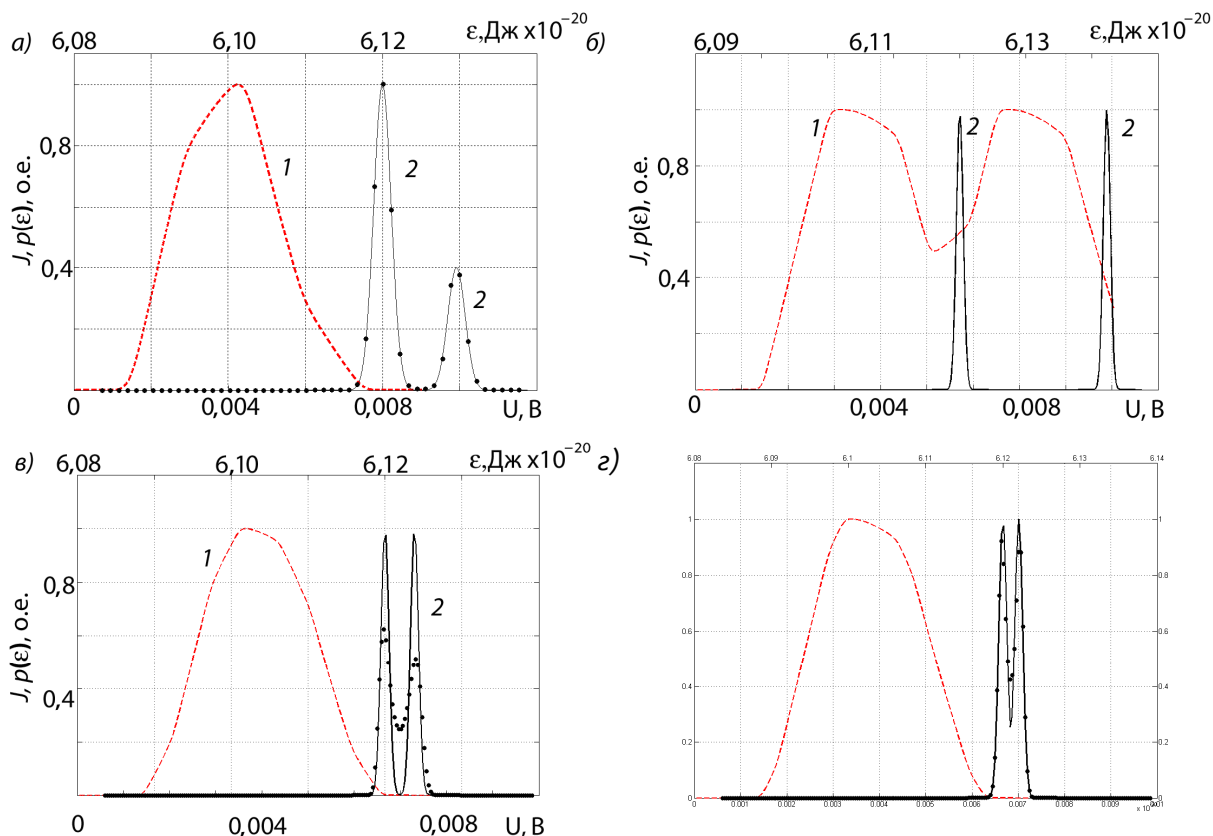


Рис.3. Примеры восстановления энергетических спектров с помощью алгоритмов Голда (а,в) и оценка разрешающей способности метода (б,в) при максимально близком расположении двух пиков для их разрешения: б – без математической обработки, в – после деконволюции при  $\rho_n \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_1=0,3825$ ,  $a_2=0,38274$ ; г – после деконволюции при  $\rho_n \leq 8,0 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_1=0,3825$ ,  $a_2=0,38263$ . 1 – зависимости нормированного тока детектора от разности потенциалов между пластинами анализатора; кривые 2 – модельные спектры  $p(\epsilon)$ , точки – восстановленные распределения частиц по энергиям.

Кроме плоского зеркала и сферического анализатора восстановление модельного спектра было проведено для гиперболического, цилиндрического зеркал, «Тутанхамона» и «Квазикона». Результаты этой работы опубликованы в [А2, А3].

**Глава 4.** Большинство традиционных систем энергоанализа располагает сравнительно небольшой величиной энергетической дисперсии, не превышающей линейную базу прибора, в качестве которой выступает расстояние между источником эмиссии электронов и детектором. В главе 4 показано, что увеличение дисперсии, среди прочего, ведёт к существенному уменьшению доли рассеянных вторичных электронов в общем токе на детектор. Из этого следует, что отношение сигнал/шум в этом случае будет больше, что весьма важно при численном восстановлении функции распределения.

Было проведено исследование скрещенных электрических полей с плоскостью симметрии  $y = 0$ , в которой ход потенциала распадается на сумму  $\phi|_{y=0} = f(x) + p(y)$ , которое показало, что они обеспечивает запас энергетической дисперсии вдвое и более превышающий известные анализаторы с рекордными параметрами: «Тутанхамон», «Арка» и «Квазикон», если взять  $f(x) = th^2 \pi x$ , либо  $f(x) = 1 - e^{-\alpha x}$ , а  $p(y) = -ky$ ,  $k > 0$ .

Для полевой структуры модифицированный «Тутанхамон» вычислено выражение для дисперсии:

$$D = W \frac{\partial P}{\partial W} = \frac{\sqrt{W}}{2} \frac{\cos \theta}{(1 - W \sin^2 \theta)^{3/2}} + \frac{kW}{4} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - W \sin^2 \theta)^2}, \quad (6)$$

она была вычислена для некоторых частных случаев и оказалось, более чем вдвое превосходит аналогичную дисперсию для «Тутанхамона».

Результаты работы по синтезу высокодисперсионных анализаторов опубликованы в [A4].

**Глава 5.** В предыдущих главах изучалось восстановление энергетического спектра путем решения одномерного интегрального уравнения, где ток зависит от потенциала развертки  $U$ . В этой главе рассматривается более сложная ситуация, когда ток частиц на детектор зависит от двух параметров:

электрического и магнитного поля анализатора. Рассматривается пример простого анализатора на базе двух плоскопараллельных пластин с магнитным полем  $H$ , перпендикулярным  $E$ . Функция эмиссии задается в виде  $f(v_{x0}, v_{y0})$ .

В результате получено выражение [A5], связывающее функцию эмиссии источника и ток на детекторе

$$J(\mu, \nu) = \int_0^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\mu \dot{y}_0^2 - \nu} f(\dot{x}_0, \dot{y}_0) d\dot{x}_0 \right] d\dot{x}_0, \quad (7)$$

параметр  $\mu$  включает зависимость траекторий частиц от магнитного поля, а параметр  $\nu$  – от электрического и магнитного полей. Оно может быть сведено к

более простой форме  $\frac{\partial J(\mu, \nu)}{\partial \nu} = \int_0^{\infty} g(\mu s - \nu, s) ds$ . Здесь  $g(r, s) = \frac{1}{2\sqrt{s}} f(r, \sqrt{s})$ .

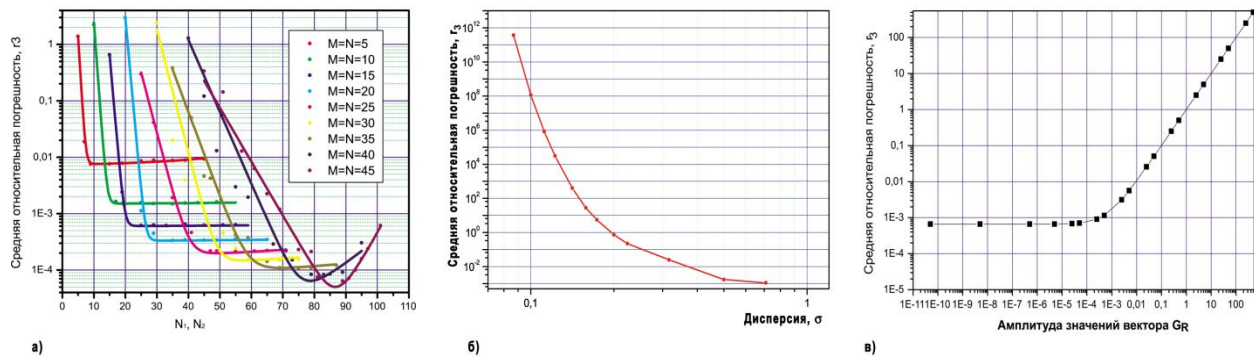


Рис. 4. *а* - зависимость средней погрешности восстановления от числа узлов сетки по  $p$  и  $q$  для разных  $N_1$  и  $N_2$ ; *б* - зависимость средней относительной погрешности восстановления двумерного распределения Гаусса от дисперсии; *в* - зависимость средней относительной погрешности восстановления от шума во входных данных.

Предлагается несколько способов решения данного уравнения: метод, основанный на Фурье-преобразовании интегрального уравнения и вычислении тока в частотной области и алгебраический метод, основанный на замене интеграла конечной суммой. Было успешно проведено численное восстановление спектра для нескольких модельных функций алгебраическим методом (рис. 4).

В заключении сформулированы основные выводы работы:

1. Установлено, что связь между измеряемым сигналом электрического электронного спектрометра, работающем в режиме, когда траектории не зависят от потенциала развертки, и реальным энергетическим спектром электронного источника существует в виде интегрального уравнения В. Вольтерра I рода с аппаратной функцией в качестве ядра.
2. Аппаратная функция непрерывна, но имеет по производной разрывы I рода, она всегда состоит из нескольких фрагментов различных аналитических функций. Кроме того, аппаратная функция является функцией отношения  $\frac{\varepsilon}{qU}$ , где  $\varepsilon$  – начальная энергия электрона,  $U$  – потенциал развертки,  $q$  – заряд электрона.
3. Вычислена аппаратная функция ряда анализаторов (плоского зеркала, 180° сферического анализатора, цилиндрического и гиперболического зеркала с вводом пучка частиц параллельно оси симметрии, «Тутанхамона» и «Квазикона»), для «Тутанхамона» она получена в аналитической форме.
4. Проведены численные эксперименты, демонстрирующие возможность решения интегрального уравнения (2) численным способом с точностью порядка 0,01%, что показано на тестовых примерах.
5. Для нахождения аппаратной функции тех анализаторов, в которых уравнения движения частиц не интегрируются аналитически, была разработана методика, основанная на прямом вычислении траекторий по дифференциальным уравнениям движения
6. Исследован класс скрещенных электрических полей с плоскостью симметрии  $y = 0$ , в которой ход потенциала распадается на сумму  $\phi|_{y=0} = f(x) + p(y)$  обеспечивает запас энергетической дисперсии вдвое и выше превышающий известные анализаторы с рекордными параметрами:



«Тутанхамон», «Арка» и «Квазикон», если взять  $f(x) = th^2 \pi x$ , либо  $f(x) = 1 - e^{-ax}$ , а  $p(y) = -ky$ ,  $k > 0$ .

7. Проведено исследование восстановления спектра электронов в однородных электрическом и магнитном полях. Получено специальное двумерное интегральное уравнение связи функции эмиссии и тока на детекторе. Проведено восстановление модельного спектра.

### **Основные публикации по теме диссертации.**

A1. Голиков Ю. К. Об аппаратной функции электростатических электронных спектрометров [Текст] / Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, И. А. Марциновский // **Научное приборостроение**. — 2011. — Т. 21, № 3. — С. 68–82.

A2. Марциновский И. А. Методы восстановления энергетических спектров в статических энергоанализаторах [Текст] / И. А. Марциновский // **Научно-технические ведомости СПбГПУ**. — 2011. — вып. 3 (129). — С. 92–98.

A3. Марциновский И. А. Адаптация алгоритмов восстановления энергетического спектра по экспериментальным данным электростатических энергоанализаторов [Текст] / И. А. Марциновский // **Научно-технические ведомости СПбГПУ**. — 2010. — вып. 3 (104). — С. 145–150.

A4. Краснова Н. К. Синтез электростатических энергоанализаторов с помощью обратных задач динамики [Текст] / Н. К. Краснова, И. А. Марциновский // **Научно-технические ведомости СПбГПУ**. — 2011. — вып. 3(104). — С. 84–91.

A5. Голиков Ю. К. Энергоанализ с угловым разрешением потоков электронов и ионов в скрещенных электрических и магнитных полях [Текст] / Ю. К. Голиков, И. А. Марциновский // **Научно-технические ведомости СПбГПУ**. — 2008. — вып. 3(59). — С. 169–176.

### **Прочие публикации по теме диссертации.**

A6. Голиков Ю. К. Об одной обратной задаче теории электростатических зеркал [Текст] / Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, К. В. Соловьев, И. А. Марциновский // Тез. докл. 8 Всерос. сем.: Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. 29–31 мая, 2007, Москва. — 2007. — С. 30.

А7. Голиков Ю. К. Восстановление спектров в высокодисперсионных энергоанализаторах [Текст] / Ю. К. Голиков, И. А. Марциновский // Тез. докл. XII Всерос. конф.: Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. 14 мая, 2008, СПб. — 2008. — С. 87.

А8. Голиков Ю. К. Ударное преобразование спектров с электрической конфигурацией «Арка» [Текст] / Ю. К. Голиков, И. А. Марциновский // Тез. докл. Всерос. конф.: Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. 14 мая, 2008, СПб. — 2008. — С. 85-86.

А9. Голиков Ю. К. Высокодисперсионные энергоанализирующие электрические поля [Текст] / Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, И. А. Марциновский // Тез. докл. 9 Всерос. сем.: Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. 27–29 мая, 2009, Москва. — 2009. — С. 46–47.

А10. Голиков Ю. К. О восстановлении точной формы энергетического спектра по измеренному току в электростатических дефлекторах [Текст] / Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, И. А. Марциновский. // Тез. докл. 9 Всерос. сем.: Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. 27–29 мая, 2009, Москва. — 2009. — С. 47–48.

А11. Голиков Ю. К. Об алгоритмах повышенной точности для восстановления энергетических спектров в электронных спектрометрах [Текст] / Ю. К. Голиков, И. А. Марциновский // Тез. докл. 10 Всерос. сем.: Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. 24–26 мая, 2011, Москва. — 2011. — С. 19.

А12. Краснова Н. К. Обратные задачи движения для электростатических анализаторов [Текст] / Н. К. Краснова, И. А. Марциновский. // Тез. докл. 10 Всерос. сем.: Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. 24–26 мая, 2011, Москва. — 2011. — С. 60-61.

### **Литература**

1. Голиков Ю. К. Теория синтеза электростатических энергоанализаторов [Текст] / Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 409 с.