

На правах рукописи

СОЛОВЬЁВ Константин Вячеславович

ПСЕВДООДНОРОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКЕ

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004 г.

Работа выполнена на кафедре физической электроники Государственного образовательного учреждения 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 (СПбГПУ),
кандидат физико-математических наук
Баранова Любовь Александровна
(ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН)

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится 17 февраля 2005 года, в ___ ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, II уч. корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан _____ декабря 2004 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.01

доктор физико-математических наук, профессор

И.А.Водоватов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Улучшение параметров современных энергоанализирующих и масс-спектрометрических приборов лимитируется предельными параметрами используемых в них электронно-оптических систем (ЭОС). Совершенствование последних возможно в том числе следующими путями: доработкой имеющихся ЭОС путем непринципиального изменения конструкции, применением дополнительных устройств согласования и/или трансформации фазовых объемов; разработкой новых электронно-оптических устройств, обладающих улучшенными характеристиками; применением новых электронно-оптических схем. Наиболее плодотворным при синтезе электронно-оптических систем оказывается подход, реализующий постановку и решение соответствующих обратных задач корпускулярной оптики. Последнее, в свою очередь, требует наличия аналитических или полуаналитических алгоритмов расчета систем, в том числе алгоритмов оптимального согласования элементов системы.

Диссертационная работа содержит варианты подходов (при движении по всем перечисленным выше путям) к решению задач создания энерго- и масс-анализирующих систем с улучшенными свойствами, объединенных общей идеологией псевдооднородных полей. Понятие псевдооднородности было введено Ю.К.Голиковым [1] для описания структуры электростатического поля вблизи плоскости антисимметрии системы. Силовые линии поля практически ортогональны к указанной плоскости в ее малой окрестности, что позволяет проводить аналогию данного поля с однородным. В то же время напряженность псевдооднородного поля может существенно меняться вдоль плоскости антисимметрии, что позволяет осуществлять с его помощью силовое воздействие на пучок, значительно отличающееся от воздействия однородного поля. Основным достоинством концепции псевдооднородности является

возможность постановки и приближенного решения с ее помощью различных обратных задач. В работе [1] понятие псевдооднородности также было распространено на меридиональные сечения осесимметричных полей, рассматриваемых вблизи конической либо цилиндрической эквипотенциали. В данной диссертации использовано как «классическое» (в смысле [1]) определение псевдооднородности, так и его расширения на полевые слои с криволинейной границей и на частные случаи скрещенных электрических и магнитных полей.

Цель работы

Разработка математической теории синтеза полевых структур и электронно-оптических систем, применяемых в аналитическом приборостроении.

Задачи исследования

1. Выработка общей физической и математической концепции псевдооднородных полевых структур.
2. Построение математического аппарата представления лапласовых потенциалов псевдооднородных электромагнитных полевых структур.
3. Разработка теории интегрирования уравнений движения ионов и электронов в области псевдооднородных слоев поля.
4. Разработка концепции оптических каркасов и исследование вопросов их согласования на световом и электронно-оптическом уровнях.
5. Разработка новой электронно-оптической схемы светосильного и высокоразрешающего электронного спектрометра с корректирующим зеркалом.
6. Оптимизация двухкаскадной симметричной схемы электронного спектрометра с промежуточным согласующим псевдооднородным зеркалом.
7. Трансформация трохотрона в обобщенный фильтр Вина путем конформного преобразования полей и траекторий в скрещенных электромагнитных полях.
8. Анализ областей применения псевдооднородных зеркал в аналитическом приборостроении.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Общая теория формирующего действия псевдооднородных слоев электромагнитного поля с аналитическими алгоритмами решения прямых и обратных задач.
2. Алгоритм согласования оптических каркасов потоков заряженных частиц между собой.
3. Новая схема светосильного энергоанализатора высокого разрешения.
4. Обобщение фильтра Вина с улучшенными характеристиками.
5. Теория поворотных согласующих электрических устройств для систем энергоанализа.

Научная новизна диссертации

1. Впервые получен ряд алгоритмов генерации классов трехмерных гармонических потенциалов, представляющих интерес для решения задач корпускулярной оптики.
2. На основе систематически разработанной теории псевдооднородных структур впервые даны алгоритмы построения электронных зеркал нового типа, позволяющих эффективно решать задачи согласования потоков заряженных частиц.
3. Предложены новые корпускулярно-оптические схемы энерго- и масс-анализаторов, обладающих улучшенными характеристиками.

Практическая значимость результатов работы

Результаты работы уже были использованы и могут использоваться в дальнейшем при синтезе спектроаналитических приборов с улучшенными корпускулярно-оптическими свойствами. В частности, на основе разработанной в работе идеологии псевдооднородных структур синтезированы входные устройства энергоанализирующих систем и согласующие элементы систем энерго- и масс-анализа. Предложен ряд новых схем спектроаналитических приборов.

Достоверность результатов, полученных аналитически, основывается на их согласии с вычислительным экспериментом и натурным экспериментом в тех случаях, когда последний был проведен.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

VIII Всесоюзном семинаре по методам расчета электронно-оптических систем (ЭОС) (Ленинград, 1985 г.), IX Республиканском семинаре по методам расчета ЭОС (Ташкент, 1988 г.), X Всесоюзном семинаре по методам расчета ЭОС (Львов, 1990 г.), IV-VI Всероссийских семинарах «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (Москва, 1999, 2001, 2003 гг.), VI Всесоюзном симпозиуме по вторично-электронной, фотоэлектронной эмиссии и спектроскопии поверхности твердого тела (Рязань, 1986), V Всесоюзном семинаре по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии (Харьков, 1988), Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 1997), Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России» (С.-Петербург, 1995).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 27 печатных работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, библиографического списка из 109 наименований, содержит 185 страниц основного текста, иллюстрируется 22 рисунками.

Личный вклад автора

Состоит в постановке ряда задач и проведении аналитических исследований в рамках поставленных перед автором задач, создании программного обеспечения и проведении конкретных расчетов, в участии в разработке новой идеологии синтеза псевдооднородных структур.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность; поставлены цели работы, задачи, приведено краткое содержание глав, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы защищаемые положения.

Первая глава содержит обзор литературы, в котором обращено внимание на вопросы, касающиеся расчета траекторий движения заряженных частиц вблизи плоскости антисимметрии поля, аналитические представления полей, обладающих плоскостью антисимметрии, либо эквипотенциальными конусами и цилиндрами. Рассмотрена литература, имеющая отношение к согласованию потоков, в том числе к согласованию на оптическом уровне, приведены примеры использования зеркал в электронной оптике. Дан обзор литературы по фильтрам Вина. Отдельно показан способ введения используемых далее в диссертационной работе безразмерных единиц измерения и безразмерных математических моделей.

В главе 2 формулируется общая концепция псевдооднородных полевых структур. Дано базирующееся на работе [1] определение псевдооднородных структур. Рассмотрена динамика первого приближения, в которой уравнения движения имеют вид

$$\ddot{x} = 0, \quad \ddot{z} = 0, \quad \ddot{y} = -E(x, z)$$

и могут быть проинтегрированы в квадратурах. Обсуждается возможность распространения понятия псевдооднородности на более широкий класс полей.

Предполагая, что в результате решения той или иной обратной задачи известно распределение поля вдоль границы, далее решаем задачу восстановления в поля в пространстве. В третьей главе рассмотрены аналитические представления псевдооднородных полевых структур в двумерном случае. Развита использующая комплексные переменные методика восстановления на плоскости XOY антисимметричного по y двумерно-гармонического потенциала, обладающего при $y=0$ заданной зависимостью

$E(x)$. Изложена процедура распространения этой методики на случай двумерных слоев с криволинейной границей. Рассмотрен псевдооднородный слой в меридиональном сечении вблизи круговой цилиндрической эквипотенциали. Представлены алгоритмы улучшения сходимости рядов, восстанавливающих поле. Рассмотрены осесимметричные поля, плоскость антисимметрии в которых ортогональна оси системы. Представлен алгоритм восстановления потенциала по радиальному распределению поля с использованием формулы Э.Уиттекера [2]
$$\varphi(r, z) = 1/\pi \int_0^\pi f(z + ir \cos \gamma) d\gamma,$$
 приведены некоторые классы потенциалов, обладающих трансаксиальной плоскостью антисимметрии. Рассмотрен псевдооднородный слой в меридиональном сечении вблизи круговой конической эквипотенциали. Указаны алгоритмы приближенного построения полей, обладающих заданной зависимостью поля от модуля радиус-вектора вдоль эквипотенциального конуса с произвольным углом полураствора.

В главе 4 рассмотрено аналитическое представление некоторых существенно трехмерных гармонических полей, обладающих плоскостями антисимметрии. Одним из способов отыскания таких полей может служить частичное разделение переменных в уравнении Лапласа в цилиндрической системе координат, т.е. поиск решения в виде $\varphi(r, z, \gamma) = F_1(r, z)F_2(\gamma)$. Такой подход при выборе вещественной константы разделения k дает $F_2(\gamma) = \sin(k(\gamma - \gamma_0))$, что позволяет говорить о наличии у искомого потенциала плоскости антисимметрии $\gamma = \gamma_0$. Дополнительная плоскость антисимметрии может быть получена при соответствующих требованиях к F_1 . Рассмотрены два способа решения уравнения для F_1 - в вещественных переменных с результатом в виде бесконечного ряда (с определением условий его обрыва) и в комплексных переменных $\omega = r + iz, \bar{\omega} = r - iz$ с результатом в виде функций, обладающих кольцевыми особенностями. Поиск конечных представлений псевдооднородных полевых структур может также базироваться на

возможности записать ряд для потенциала вблизи плоскости антисимметрии в

$$\text{виде } \varphi = E(\omega, \bar{\omega})z - \frac{2^2}{3!} \frac{\partial^2 E}{\partial \omega \partial \bar{\omega}} z^3 + \frac{2^4}{5!} \frac{\partial^4 E}{\partial \omega^2 \partial \bar{\omega}^2} z^5 - \dots, \quad \omega = x + iy, \bar{\omega} = x - iy. \text{ При}$$

этом поле вида $E = A(\omega) + B(\bar{\omega})$ сохраняет лишь первый член ряда, поле вида $E = \bar{\omega} \int A(\omega) d\omega + \omega \int \bar{A}(\bar{\omega}) d\bar{\omega}$ - лишь второй и т.д. В работе приведены примеры использования указанной методики обрыва рядов для генерирования как известных, так и новых классов полей с плоскостью антисимметрии.

Рассмотрены потенциалы Донкина [2] $\varphi = \text{Im} \left(\Omega \left(\frac{x + iz}{\rho + y} \right) \right)$, являющиеся при

соответствующем выборе порождающего комплексного потенциала Ω (он должен становиться вещественным при вещественном аргументе) антисимметричными по z функциями. Построена процедура восстановления потенциала Донкина по распределению напряженности поля в плоскости $z=0$.

Глава завершается изложением приемов синтеза антисимметричных гармонических потенциалов из произвольных гармонических функций.

Глава 5 содержит изложение трех алгоритмов расчета траекторий движения заряженных частиц в псевдооднородном приближении повышенной точности. Первый способ основан на введении понятия псевдооднородной эквивалентности структур, означающей совпадение первых членов их разложения в ряд в окрестности плоскости антисимметрии, и замене исходной структуры другой, псевдооднородно эквивалентной первой, но допускающей нахождение траекторий аналитически. В качестве второй структуры выбран потенциал $\tilde{\varphi} = (f(x + y) - f(x - y))/2$, первый член разложения которого в ряд в окрестности $y=0$ совпадает с соответствующим членом «классического» [1] разложения. Указанный потенциал позволяет после замены $\xi = x + y$, $\eta = x - y$ разделить переменные в уравнениях движения:

$\ddot{\xi} = -E(\xi)$, $\ddot{\eta} = E(\eta)$. Второй алгоритм расчета траекторий использует представление приращений координат и скоростей частицы в виде рядов по степеням времени пролета либо по начальным скоростям. Коэффициентами

рядов выступают комбинации степеней и производных поля E . В третьем способе применяется геометризация уравнений движения, приводящая к уравнению траектории $2[\varphi(x, y) - E] \frac{d^2 y}{dx^2} + \left[\varphi_x \frac{dy}{dx} - \varphi_y \right] \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] = 0$, при подстановке в которое приближенного выражения $\varphi = E(x)y$ получаем линейные по E, E' соотношения, удобные для решения обратных задач.

В главе 6 рассмотрены вопросы, связанные с понятием оптических каркасов и вопросами их согласования на оптическом уровне. Дано понятие об оптическом каркасе как обобщении понятия оптической оси на случай большей размерности. При построении многокомпонентной системы, работающей с пучками большой апертуры недостаточно согласования оптических осей компонентов (каркасов размерности ноль) и рассмотрения только приосевых траекторий. Необходимо отображение элементов одного пучка в элементы другого, обеспечивающее согласование по ряду параметров пучка. В главе представлена доведенная до уровня алгоритма методика согласования в оптическом приближении однопараметрических семейств прямых, моделирующая согласование в дрейфовом пространстве каркасов размерности 1 двух электронно-оптических элементов. Рассмотрены возможности согласования двухпараметрических семейств прямых.

Глава 7 посвящена вопросам согласования однопараметрических семейств прямых на электронно-оптическом уровне. Приведены методики построения криволинейного псевдооднородного слоя, обеспечивающего трансформирующее воздействие на поток заряженных частиц, аппроксимирующее воздействие криволинейного зеркала на световой поток в приближении «световой» геометрической оптики. Рассмотрен метод построения согласующей (в кубическом приближении) заданные потоки заряженных частиц полевой конфигурации, имеющей прямолинейную границу. Построено дифференциальное уравнение, позволяющее найти напряженность поля вдоль границы по характеристикам потоков. Рассмотрены некоторые

частные случаи потоков, допускающих аналитическое решение указанного уравнения.

Глава 8 содержит сведения о некоторых электронно-оптических системах, реализующих идеологию данной работы, а также проекты возможного применения изложенных в диссертации идей. В качестве примеров приводятся разработки входных устройств для энергоанализаторов типа «Квазикон», цилиндрическое зеркало. Входные устройства позволяют выдвинуть образец из анализатора и тем самым улучшить доступность первого для внешних возбуждающих облучений. В рамках российско-шведского проекта выполнена разработка энергоанализатора, содержащего построенное по изложенной технологии промежуточное согласующее зеркало, позволяющее существенно уменьшить абберационное размытие пучка на детекторе. Предложены новые электронно-оптические схемы спектроаналитических приборов, реализующие идею разделения диспергирующего и концентрирующего компонентов и обеспечивающие работу с пучками большой апертуры. При этом, в частности, используется возможность построения средствами рассмотренного в данной работе математического аппарата специального собирающего зеркала, обеспечивающего идеальную (в оптическом приближении) фокусировку пучка после прохождения последним диспергирующего электронно-оптического элемента. Достоинством настоящего подхода является возможность отказаться от эвристических методов поиска редко встречающихся полевых структур, сочетающих в одном монополевом устройстве хорошую фокусировку обладающего большим угловым раствором пучка и высокую дисперсию и использовать разработанные в диссертации алгоритмы построения двухкомпонентных систем гарантированно высокого качества.

В главе 9 рассмотрена идеология синтеза фильтров Вина с улучшенными ионно-оптическими свойствами. Использование метода неопределенных коэффициентов позволило найти неоднородные электрические и магнитные

поля, обеспечивающие стигматичную фокусировку пучка и минимизацию aberrации по направлению, в котором осуществляется селекция моноэнергетических ионов по массам. Наличие в структуре полевых функций неограниченного количества свободных параметров оставляет возможность проведения дальнейшей оптимизации как параметров пучка, так и конфигурации поля. Использование метода одновременного преобразования траекторий и задающих их полей [3] предоставило возможность путем трансформации трохоидаальных траекторий в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях получить масс-сепарирующую систему с идеальной фокусировкой в одной плоскости и параксиальной – в другой.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработано несколько алгоритмов генерации базисных аналитических представлений лапласовых потенциалов, представляющих интерес для решения задач корпускулярной оптики. Новые структуры уже применены при синтезе электронных спектрометров с повышенным пропусканием.
2. Построен новый класс полевых структур, названных псевдооднородными, которые можно положить в основу теории электронных зеркал нового типа со специальными, весьма ценными при решении задач электронной спектроскопии, свойствами.
3. Построена оптическая теория согласования конгруэнций при помощи зеркал и на ее основе предложены методики уменьшения aberrаций для пучков с большими апертурами.
4. Разработан математический аппарат решения обратных задач для динамики частиц в псевдооднородных структурах.
5. На базе обратных задач разработаны алгоритмы построения электронно-оптических зеркал, эквивалентных оптическим.
6. Построены алгоритмы согласования конгруэнций при помощи электронных зеркал, минуя оптические аналоги.
7. Доказан ряд новых математических теорем теории согласования.

8. Предложены новые электронно-оптические схемы двухкаскадных спектрометров с компенсирующим промежуточным зеркалом, которое превращает весь оптический тракт во времяпролетный масс-анализатор с высоким уровнем угловой фокусировки и существенно улучшает энергоанализирующие характеристики системы.
9. Предложен путь совершенствования призмной аналитической оптики на базе теории зеркального согласования.
10. Предложена новая схема энергоанализаторов, состоящих из высокодисперсионного полевого элемента и согласующего зеркала.
11. Построена теория фильтров Вина с неоднородными полями.
12. Развита методика конформной трансформации скрещенных электрических и магнитных полей и задаваемых ими семейств траекторий заряженных частиц и на ее базе построена теория обобщенных фильтров Вина с идеальной фокусировкой в плоскости симметрии системы.

Цитируемая литература

1. Голиков Ю.К. Псевдооднородные электростатические поля с заданными электронно-оптическими характеристиками // Труды ЛПИ. № 397.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1983.- С. 82-85.
2. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. Т. 2.- М.: ГИФМЛ, 1963.
3. Голиков Ю.К. Конформно-инвариантные фокусирующие системы // Труды ЛПИ. № 345.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1975.- С. 82-84.

Основные результаты исследований опубликованы в работах

1. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. Электронно-оптические свойства осесимметричного электростатического поля с потенциалом $U(r,z)=U_0z\ln r$ // Труды ЛПИ. № 412.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1985.- С. 79-81.

2. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. О фокусирующих и дисперсионных свойствах одного осесимметричного электростатического поля // Материалы VIII Всесоюзного семинара по методам расчета ЭОС.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1986.- С. 76.
3. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Холин Н.А. Электростатический энергоанализатор типа «цилиндрическое зеркало» // Авторское свидетельство № 1430999. Приоритет от 21.02.86.
4. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Уткин К.Г., Чепарухин В.В., Соловьев К.В., Хрущев А.В. Об увеличении площади сканирования энергоанализатора типа цилиндрического зеркала // Тез. докл. VI Всесоюзн. симпозиума по вторично-электронной, фотоэлектронной эмиссии и спектроскопии поверхности твердого тела.- Рязань: Изд. Рязанского МТЦ НТИП.- 1986.- С. 164-165.
5. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В. О новых возможностях синтеза масс-спектрометрических устройств с прямолинейной осью // Тез. докл. V Всесоюзного семинара по вторично-ионной и ионно-фотонной эмиссии.- Харьков: Изд. ХГУ.- 1988.- С. 136-137.
6. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Чепарухин В.В., Чуваев М.И. Теория поворотных электростатических систем для электронной спектроскопии // Тез. докл. республиканского семинара по методам расчета ЭОС.- Ташкент: Изд. «Фан».- 1988.- С. 8.
7. Матышев А.А., Соловьев К.В. О движении заряженных частиц в двумерных скрещенных электрическом и магнитном полях вблизи прямолинейной оси // Тез. докл. республиканского семинара по методам расчета ЭОС.- Ташкент: Изд. «Фан».- 1988.- С. 77.
8. Голиков Ю.К., Соловьев К.В., Чепарухин В.В., Уткин К.Г. Расчет электростатических полей с заданной степенной зависимостью напряженности вдоль эквипотенциального конуса // Труды ЛПИ. № 429.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1989.- С. 64-67.

9. Матышев А.А., Соловьев К.В. Исследование масс-анализирующих систем с неоднородными скрещенными полями и прямолинейной оптической осью // Труды ЛПИ. № 429.- Л.: Изд. ЛПИ.- 1989.- С. 75-79.
10. Матышев А.А., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. Двухэлектродные осесимметричные входные электронно-оптические системы для энергоанализа // Тез. докл. X Всесоюзн. семинара по методам расчета ЭОС.- Львов.- 1990.- С. 52.
11. Соловьев К.В. Некоторые комбинированные электромагнитные поля с идеальной фокусировкой в одной плоскости // Тез. докл. X Всесоюзного семинара по методам расчета ЭОС.- Львов.- 1990.- С. 52.
12. Голиков Ю.К., Матышев А.А., Соловьев К.В. Ионно-оптические свойства фильтров Вина с неоднородными полями // ЖТФ.- 1991.- Т. 61.- Вып. 1.- С. 137-143.
13. Голиков Ю.К., Соловьев К.В. Некоторые комбинации электрических и магнитных полей, перспективные для использования в масс-спектрометрии // Труды ЛГТУ. № 436.- Л.: Изд. ЛГТУ.- 1991.- С. 63-65.
14. Голиков Ю.К., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Чепарухин В.В., Шорина Т.А. Псевдооднородные электростатические электронно-оптические элементы // Труды ЛГТУ. № 436.- Л.: Изд. ЛГТУ.- 1991.- С. 65-71.
15. Голиков Ю.К., Соловьев К.В. Использование метода конформных преобразований при построении полевых структур для масс-сепарации ионов // ЖТФ.- 1992.- Т. 62.- Вып. 3.- С. 188-191.
16. Голиков Ю.К., Соловьев К.В., Аристакесян А.В. Оптимизация входных электростатических устройств в электронных спектрометрах // Тез. докл. Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России». Ч. 9.- СПб.: Изд. СПбГТУ.- 1995.- С. 63.
17. Соловьев К.В. Система предварительного торможения и отклонения пучка на основе полей с конической эквипотенциалью // Тез. докл. международной конференции «Ядерная и радиационная физика».- Алматы.- 1997.- С. 83.

18. Голиков Ю.К., Соловьев К.В., Уткин К.Г., Григорьев Д.В. Новый базисный ряд осесимметричных гармонических потенциалов для синтеза энергоанализаторов // Тез. докл. IV Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн. электронной оптики».- М.- 1999.- С. 11-12.
19. Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Краснова Н.К., Любчик А.Д., Соловьев К.В. Синтез электродных конфигураций для электронных спектрометров // Тез. докл. V Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн.электронной и ионной оптики».- М.- 2001.- С. 16-17.
20. Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Краснова Н.К., Любчик А.Д., Соловьев К.В. Согласующие электростатические квазиэллиптические зеркала для электронной спектроскопии и масс-спектрометрии // Тез. докл. V Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн.электронной и ионной оптики».- М.- 2001.- С. 18-19.
21. Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Краснова Н.К., Соловьев К.В. О некоторых аналитических связях осесимметричных и двумерных лапласовых полей // Тез. докл. VI Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн. электронной и ионной оптики».- М.- 2003.- С. 21-22.
22. Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В. Симметричные и антисимметричные лапласовы потенциалы с элементарным представлением // Тез. докл. VI Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн. электронной и ионной оптики».- М.- 2003.- С. 26-28.
23. Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Краснова Н.К., Соловьев К.В. Обобщенное комплексное разделение переменных в теории осесимметричных потенциалов // Тез. докл. VI Всеросс. семинара «Проблемы теор. и прикладн. электронной и ионной оптики».- М.- 2003.- С. 29-30.
24. Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В., Григорьев Д.В., Любчик А.Д. Согласующие и корректирующие электрические зеркала в электронной оптике // Прикладная физика.- 2002.- № 3.- С. 55-67.

25. Golikov Y.K., Krasnova N.K., Solovjev K.V., Grigoriev D.V., Lubchich A.D. Matching and correcting electric mirrors in electron optics // Proc. of SPIE.- 2002.- N 5025.- P. 15-25.
26. Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В., Григорьев Д.В. О некоторых аналитических связях осесимметричных и двумерных лапласовых полей // Прикладная физика.- 2004.- № 1.- С. 47-49.
27. Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В., Григорьев Д.В. Обобщенное комплексное разделение переменных в теории осесимметричных потенциалов // Прикладная физика.- 2004.- № 1.- С. 124-126.