

На правах рукописи

СТРАШНОВ ЮРИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

**АКСЕПТАНС КВАДРУПОЛЬНОГО ФИЛЬТРА МАСС  
С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ КВАДРУПОЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ  
КОЛЕБАНИЙ ИОНОВ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена кафедре общей и теоретической физики и методики преподавания физики Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина»

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук, профессор  
**Конёнков Николай Витальевич**

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор  
**Галль Лидия Николаевна**

- доктор физико-математических наук, профессор  
**Трубицын Андрей Афанасьевич**

Ведущая организация: ОАО Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА»

Защита состоится 16 Февраля 2012 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, учебный корпус №2, ауд. 470

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 212.229.01,

доктор техн. наук, профессор



А.С. Коротков

## Общая характеристика работы

За последние 10 лет были теоретически и экспериментально исследованы пропускание и разрешающая способность квадрупольного фильтра масс (КФМ) при различных методах параметрического возбуждения. Было обнаружено, что работа в островах стабильности фильтра масс с круглыми электродами устраняет низко-массовый хвост пика и тем самым возможно достижение высокой изотопической чувствительности  $10^{10}$ . Для первой области стабильности теория аксептанса фильтра масс была создана еще в 70 гг. XX в. Тоддом и Доусоном. Однако автоматический перенос ее результатов на острова стабильности требовал обоснования, поскольку уравнения движения формально являлись уже не уравнениями Матье, а уравнениями Хилла. Аксептанс - область допустимых начальных координат и скоростей на входной апертуре анализатора, когда ионы выделенной массы проходят анализатор. Он определяет коэффициент пропускания фильтра масс и, в конечном итоге, чувствительность анализа. Таким образом, исследование аксептанса в островах стабильности представляется актуальным и своевременным.

Применение временных гармоник электрического поля приводит к параметрическому резонансному возбуждению колебаний ионов и образованию островов стабильности на плоскости параметров  $a, q$  уравнения Матье. Работа в островах позволяет увеличить разрешающую способность и изотопическую чувствительность фильтра масс при использовании цилиндрических электродов с относительно грубой сборкой анализатора. Изучение ионно-оптических свойств этих островов в терминах фазовой и пространственной динамики позволяет определить условия оптимального согласования как статического, так и импульсного источника ионов с квадрупольным анализатором.

**Объект исследования:** острова стабильности при различных способах их создания: амплитудной, частотной или фазовой модуляцией питающих напряжений и дополнительным ВЧ напряжением.

**Цель работы:** теоретическое обоснование и определение структуры аксептанса квадрупольного фильтра масс с параметрическим резонансным возбуждением колебаний ионов.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

- Разработка теоретических положений для расчета аксептанса КФМ в режиме работы верхнего острова стабильности, возбуждаемого параметрическим резонансом.
- Разработка методик расчета аксептанса КФМ в верхнем острове стабильности и соответствующего программного обеспечения.
- Исследование динамических характеристик (траекторий ионов, параметров фазовых эллипсов, контуров пропускания, плотности рас-

пределения, спектра частот колебаний ионов) для трех способов параметрического возбуждения колебаний ионов: дополнительным ВЧ напряжением; амплитудной модуляцией; частотной (фазовой) модуляцией питающего ВЧ напряжения.

### Научная новизна

1. Обоснованы теоретические положения определения акцептанса квадрупольного фильтра масс, работающего в верхнем острове стабильности, создаваемом различными способами параметрического резонансного возбуждения колебаний ионов. Положения заключаются в определении периода начальной фазы влета ионов в ВЧ поле и влиянии сдвига фаз между ВЧ напряжением и модулирующим сигналом, на основании которых определяется матрица преобразования начальных координат и скоростей за совместный период.
2. Предложен метод расчета спектра колебаний ионов на основе использования быстрого преобразования Фурье. Установлена структура частотного спектра колебаний ионов в рабочих островах стабильности.
3. Создан и реализован численный метод расчета фазовых эллипсов и контуров пропускания на плоскости начальных координат и скоростей ионов. Изучена структура акцептанса фильтра масс и влияние краевого поля на него.
4. Обоснован метод расчета плотности распределения ионов по сечению пучка, усредненной за период фазы влета ионов в ВЧ поле и изучен характер распределения при работе в островах стабильности.

### Научные положения, выносимые на защиту

1. Параметры фазовых эллипсов  $A$ ,  $B$  и  $\Gamma$  и параметр стабильности  $\beta$  в островах стабильности, возбуждаемых параметрическим резонансным возбуждением колебаний ионов путем (i) добавочного ВЧ напряжения, (ii) амплитудной модуляцией питающих напряжений или (iii) фазовой или частотной модуляцией ВЧ напряжения, определяются через элементы матрицы преобразования  $\|m_{i,j}\|_{P\pi}$  за период  $P\pi$  по формулам:

$$A = \frac{m_{11} + m_{22}}{2 \cos \pi\beta}, \quad B = \frac{m_{12}}{\sin \pi\beta}, \quad \Gamma = \frac{-m_{21}}{\sin \pi\beta}, \quad \beta = \arccos\left(\frac{m_{11} + m_{22}}{2}\right) \frac{1}{\pi}. \quad (1)$$

Период  $P\pi$  соответствует периоду изменения начальной фазы влета ионов в ВЧ поле, период сдвига фаз между ВЧ напряжением и модулирующим сигналом  $\alpha = \pi$ . Целое число  $P$  выражается через отношение частот  $\nu = \omega/\Omega = k/P$ , представляемое в виде простой несократимой дроби,  $k < P$ , а период  $\pi$  соответствует периоду  $T = 2\pi/\Omega$ ,  $\Omega$  и  $\omega$  – круговые частоты основного и модулирующего ВЧ напряжения.

2. Оптимальное время пролета ионами входного краевого поля составляет приблизительно 3.0 периода ВЧ напряжения и оптимальный интервал фазы ВЧ напряжения для ввода ионов составляет 2-4 периода ВЧ напряжения, когда достигается максимум пропускания.

3. Структуру частотного спектра колебаний ионов по координатам  $x$  и  $y$  в островах стабильности можно выразить в виде формул:

$$\omega_{n,k}^x / \Omega = |\pm n + (P-1)/2P \pm k\delta_x(a,q)/2P|, \quad n, k = 0, 1, 2, \quad (2)$$

$$\omega_{n,k}^y / \Omega = |\pm n + 1/2P \pm k\delta_y(a,q)/2P|, \quad n, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где величины  $\delta_x(a,q), \delta_y(a,q) < 1/P$  по всей области параметров острова стабильности  $a, q$  при соотношении частот  $\omega/\Omega = S/P$ , представляющем простую несократимую дробь,  $S < P$  – целые числа,  $\omega$  и  $\Omega$  – частоты модулирующего и основного ВЧ напряжения.

### Достоверность

Достоверность результатов исследований подтверждается хорошим совпадением контуров пропускания, рассчитанных на основе теории аксептанса и на основе прямого траекторного численного эксперимента. Совпадение результатов расчета аксептанса независимыми методами указывает на справедливость определения параметров фазовых эллипсов на периоде  $P\pi$  и выдвинутых положений.

Численный эксперимент основан на прямом интегрировании уравнений движения ионов. Интегрирование уравнений движения ионов осуществлялось методом Рунге-Кутты – Ньюстрёма – Дорманда-Принса (РК-N-DR) 6(7) порядка с переменным шагом интегрирования. Погрешность расчета траектории на интервале 200 периодов ВЧ поля составляла порядка  $10^{-4}r_0$  ( $r_0$  – радиус поля), что достаточно для практических приложений.

### Практическая значимость работы

1. Рассчитаны положения тридцати островов стабильности на плоскости параметров  $a, q$ , пригодных для практического использования. На основании этого определены рабочие параметры (амплитуды и частоты основного и добавочного ВЧ напряжений, а также величины постоянного напряжения) квадрупольного масс-спектрометра, разрабатываемого на предприятии «Шибболет» (г. Рязань).

2. Разработаны численные программы расчета параметров фазовых эллипсов  $A, B$  и  $\Gamma$  и контуров пропускания на фазовых плоскостях поперечных начальных координат и скоростей (аксептансы КФМ), применяемые при проектировании источников ионов на предприятии «Шибболет» (г. Рязань).

3. Предложен и реализован численный метод расчета спектра колебаний ионов на основе прямого интегрирования уравнений движения ионов в островах стабильности с последующим быстрым преобразованием Фурье.
4. Создана программа расчета плотности ионов в поперечном сечении пучка, усредненном за период  $\pi P$ , что важно при анализе влияния объёмного заряда на сдвиг линии по шкале массовых чисел.
5. Предложен метод расчета контуров по заданному уровню пропускания на основе прямого расчета траекторий при работе в островах стабильности. Этот метод может быть применен не только к случаю идеального квадрупольного поля, но и для поля, создаваемого любой квадрупольной структурой.
6. Созданы теоретические основы конструирования источников ионов для оптимального согласования иммитанса источника и акцептанса фильтра масс, работающего в верхнем острове стабильности.

**Апробация работы.** Результаты исследований представлены на V международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, РФ, 2008), на III всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» (Москва, РФ, 2009), на всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Приоритетные направления современной Российской науки глазами молодых ученых» (Рязань, РФ, 2009) и на IV Всероссийской конференции-школе с международным участием «Фундаментальные вопросы масс-спектрометрии и ее аналитические применения» (Звенигород, РФ, 2010)

По материалам диссертации опубликовано 11 работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 69 наименований. Она изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу и 64 рисунка.

#### **Структура и основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, выделены нерешенные научные проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Приведены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, отмечена практическая значимость выполненных исследований.

**Первая глава** диссертации представляет собой обзор литературы, в котором проанализированы:

- уравнения движения и первая область стабильности;
- частотный спектр колебаний ионов в первой области стабильности;
- фазовые эллипсы и аксептанс КФМ;
- методы параметрического возбуждения колебаний ионов;

Обзор литературы завершается постановкой конкретных задач, решаемых в диссертационной работе.

**Вторая глава** посвящена описанию фазово-пространственных характеристик КФМ и развивается подход определения аксептанса и плотности распределения ионов по сечению пучка в режиме сепарации верхнего острова стабильности, возбуждаемого различными методами.

Уравнения движения ионов при различных способах параметрического возбуждения в островах стабильности и наличии краевого входного поля имеют вид:

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} + g(\xi)f(z)x = 0; \quad \frac{d^2y}{d\xi^2} - g(\xi)f(z)y = 0; \quad z = \frac{z_f \xi}{n_f \pi}, \quad (4)$$

где  $x$  и  $y$  – поперечные координаты.

В зависимости от способа параметрического возбуждения функция  $g(\xi)$  имеет вид:

**А.** Добавочное ВЧ напряжение с относительной частотой  $\nu$  и относительной амплитудой  $q'$ :

$$g(\xi) = a - 2q \cos 2(\xi - \xi_0) - 2q' \cos(2\nu(\xi - \xi_0) - 2\alpha). \quad (5)$$

**В.** Амплитудная модуляция питающих напряжений с относительной частотой  $\nu$  и параметром модуляции  $m$

$$(i) \quad g(\xi) = a - [2q \cos 2(\xi - \xi_0)][1 + m \cos(2\nu\xi - 2\alpha)]; \quad (6)$$

$$(ii) \quad g(\xi) = [a - 2q \cos 2(\xi - \xi_0)][1 + m \cos(2\nu\xi - 2\alpha)]; \quad (7)$$

$$(iii) \quad g(\xi) = a[1 + m \cos(2\nu\xi - 2\alpha)] - 2q \cos 2(\xi - \xi_0); \quad (8)$$

где (i) соответствует модуляции ВЧ напряжения; (ii) – модуляции полного питающего напряжения и (iii) – модуляции постоянного напряжения.

**С.** Частотная или фазовая модуляция ВЧ напряжения с относительной частотой  $\nu$  и параметром модуляции  $m$

$$g(\xi) = a - 2q \cos[2(\xi - \xi_0) + m \cos(2\nu(\xi - \xi_0) - 2\alpha)]; \quad (9)$$

Безразмерные параметры выражаются следующим образом:

$$a = \frac{8eU}{m\Omega^2 r_0^2}, \quad q = \frac{4eV}{m\Omega^2 r_0^2}, \quad \nu = \frac{\omega}{\Omega}, \quad \xi = \frac{\Omega t}{2}, \quad q' = \frac{4eV'}{m\Omega^2 r_0^2} = q \frac{V'}{V}, \quad (10)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса иона,  $r_0$  – радиус поля,  $\xi_0$  – начальная фаза влета иона в ВЧ поле,  $\alpha$  – сдвиг фаз между основным и малым добавочным ВЧ напряжениями,  $V$  – амплитуда ВЧ напряжения с круговой частотой  $\Omega$ ,  $V'$  – амплитуда добавочного ВЧ напряжения с круговой частотой  $\omega$ . Функция  $f(z)$ , описывающая экспоненциальную модель нарастания потенциала входного краевого поля, равна:

$$f(z) = 1 - \exp(-2.13z - 1.55z^2), \quad 0 \leq z \leq 1.5. \quad (11)$$

Для всех рассматриваемых случаев функции  $g(\xi)$  (5)-(9) имеют наименьший период  $\pi P$  при кратном отношении частот  $\omega/\Omega = k/P = \nu$ , где  $k < P$  и  $k, P$  – целые числа. Начальная фаза  $\xi_0$  изменяется на интервале  $0 - \pi P$ , а сдвиг фаз  $\alpha$  на интервале  $0 - \pi$ . Вид функции  $g(\xi)$  определяет форму напряжений, подаваемых на электроды фильтра масс. В итоге параметры фазовых эллипсов  $A, B$  и  $\Gamma$  и параметр  $\beta$  в острове стабильности рассчитывались по формулам (1) на интервале  $0 - \pi P$ .

Развиты методы численного расчета параметров  $A, B$  и  $\Gamma$  и на основе этого – аксептанса КФМ и плотности распределения ионов по сечению пучка. Показано, что плотность ионов максимальна в центре пучка и распределение вытянуто по координате  $x$ , вдоль которой расположены электроды, на которые подают положительное напряжение  $+U$  при анализе положительных ионов.

**В третьей главе** исследуются фазово-пространственные и частотные характеристики фильтра масс с добавочным ВЧ напряжением (способ А) в островах стабильности с параметрами  $\nu = 1/10$  и  $\nu = 9/10$ , когда ширина полос нестабильности вблизи вершины первой невозмущенной зоны стабильности наибольшая.

Верхний четырехугольник стабильности показан на рис. 1. Он отсекается полосами нестабильности, следующими вдоль изолиний  $\beta_x = (P-1)/P$  и  $\beta_y = 1/P$ , где  $\beta_x$  и  $\beta_y$  – параметры стабильности невозмущенной зоны стабильности. Пунктирные линии – линии равного значения параметров стабильности  $\beta_x$  и  $\beta_y$  в острове  $ABCD$ .

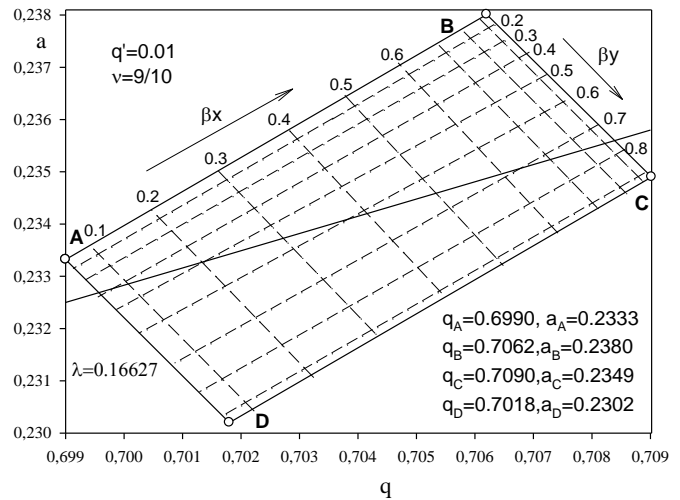


Рис. 1. Рабочий остров стабильности с параметрами возбуждения:  $q' = 0.01$  и  $\nu = 9/10$ . Пунктирные линии – изолинии характеристических показателей  $\beta_x$  и  $\beta_y$ .  $AB$  и  $DC$  – границы полосы стабильности по координате  $y$ ,  $AD$  и  $BC$  – по координате  $x$ .



Спектры колебаний ионов по координатам  $x$  и  $y$  (рис. 2) существенно различаются и имеют такую же структуру, как и в первой зоне стабильности. По координате  $x$  спектр представлен дублетами сильных гармоник вблизи частот  $n\Omega/2, n=1,2,\dots$ ; для  $y$ -колебаний основные дублеты гармоник локализуются вблизи частот  $n\Omega, n=0,1,2,\dots$ . Из-за наличия мощного дублета гармоник вблизи частоты  $\Omega/2$  колебания по координате  $x$  имеют вид биений во всех точках острова стабильности. Наибольшая гармоника по координате  $y$  локализуется вблизи нулевой частоты. Спектры схожи для случая параметрического возбуждения сигналом высокой частоты ( $\nu = \omega/\Omega = 9/10$ ) и сигналом низкой частоты ( $\nu = 1/10$ ).

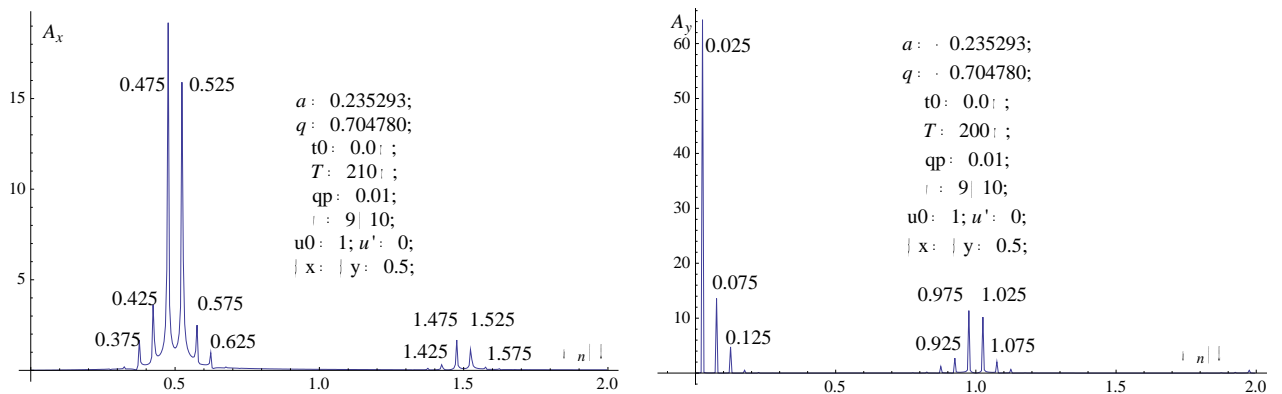


Рис. 2. FFT-спектры колебаний ионов по координатам  $x$  и  $y$  в центре четырехугольника стабильности ( $a=0.235293, q=0.704780, \beta'_x=\beta'_y=0.5000$ ).

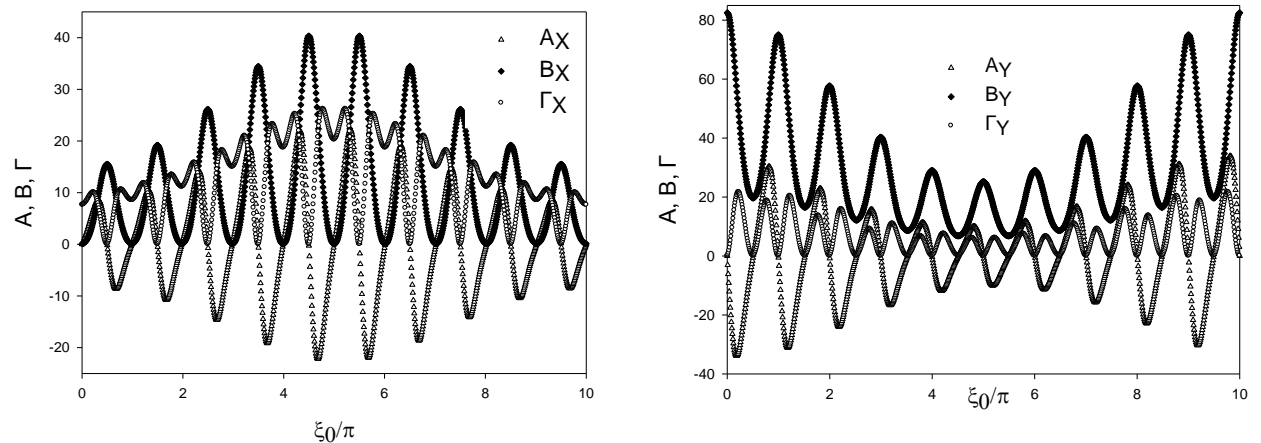
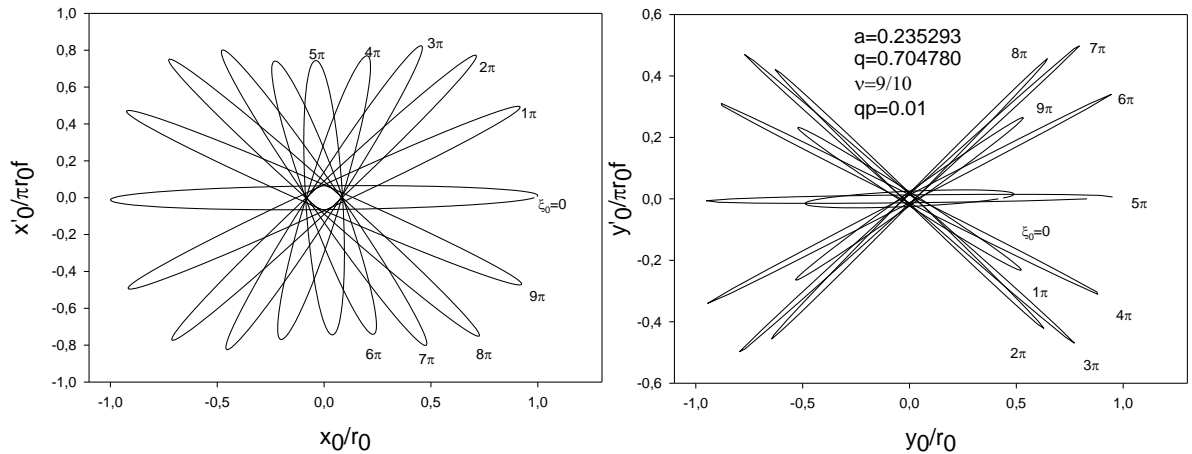
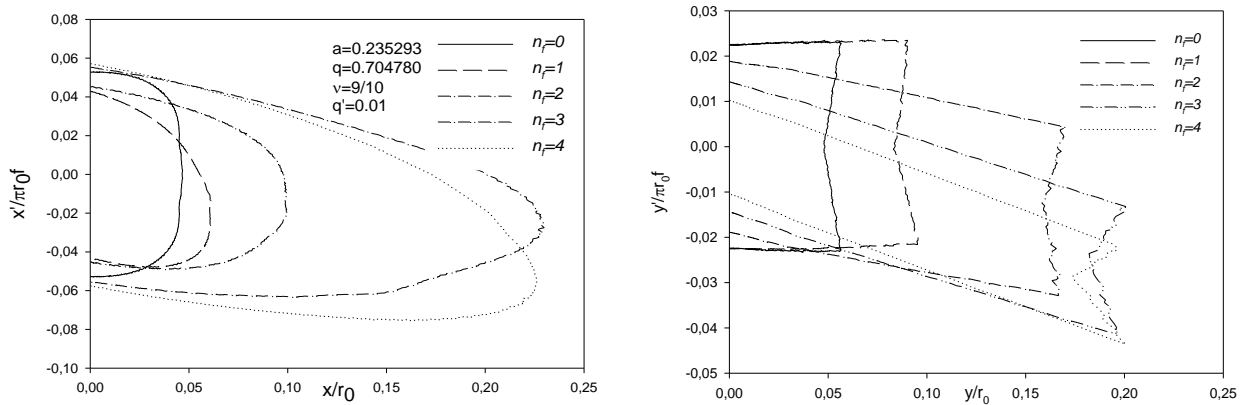


Рис. 3. Зависимость параметров  $A, B, \Gamma$  от начальной фазы влета  $\xi_0$  для  $x$ -траекторий (а) и для  $y$ -траекторий (б) в точке области стабильности  $a=0.235293, q=0.704780$  ( $\beta_x=\beta_y=0.5000$ ). Сдвиг фаз  $\alpha=0$ .



**Рис. 4.** Фазовые эллипсы для точки  $a=0.2352934$ ,  $q=0.7047803$  ( $\beta_x = \beta_y = 0.5$ ) для различных начальных фаз  $\xi_0$ .

Характер изменения параметров фазовых эллипсов с изменением начальной фазы на интервале  $0 - \pi P$  имеет осциллирующий характер с периодом  $\pi$  (рис. 3). Максимум параметра фазового эллипса  $B$ , определяющего аксептанс, зависит от сдвига фаз  $\alpha$  между основным и добавочным питающими напряжениями. Эллипсы захвата с изменением начальной фазы влета ионов в ВЧ поле более равномерно распределены на фазовой плоскости  $x, x'$  (рис. 4).



**Рис. 5.** Влияние краевых полей на аксептанс фильтра масс при работе в острове стабильности с параметрами  $q'=0.01$ ,  $\nu=9/10$  в точке  $a=0.2352934$ ,  $q=0.7047803$ .  $n_f$  – число периодов ВЧ поля пребывания ионов во входном краевом поле. 50% уровень пропускания.

Контуры (рис. 5), ограничивающие области допустимых начальных координат и скоростей, не изменяют своей формы в различных точках на линии сканирования  $a = 2\lambda q$ ; изменяется лишь ограничиваемая контуром площадь (величина аксептанса).

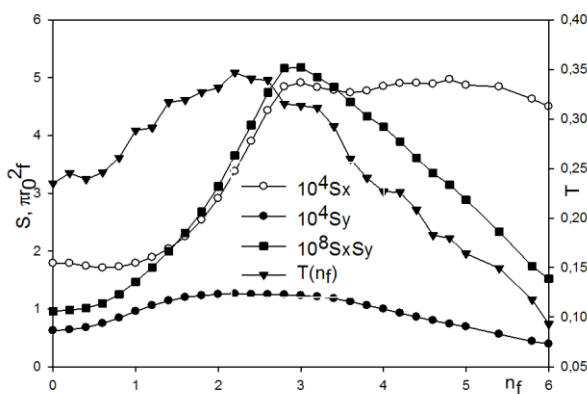
Контуры различны для координат  $x$  и  $y$ . Аксептанс по координате  $y$  меньше, чем по координате  $x$  и для случаев  $\nu = 9/10$  и  $\nu = 1/10$ .

С увеличением времени  $n_f$  пребывания ионов в краевой области аксептансы по координатам  $x$  и  $y$  возрастают (рис. 5). Однако  $y$ -аксептанс достигает максимума в зависимости от  $n_f$  ранее. Поэтому комбинированный аксептанс достигает максимума, как и в случае обычного режима сепарации, при  $n_f \cong 3.0$ .

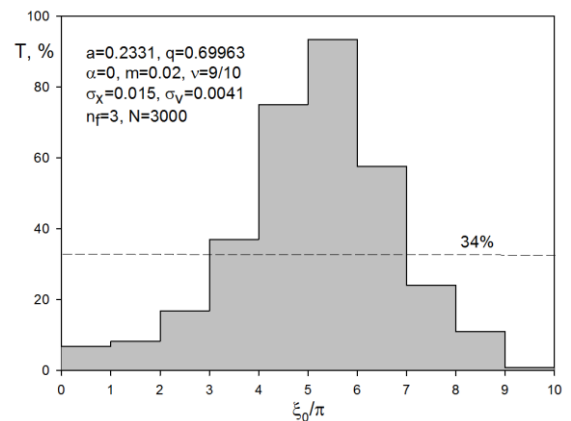
При параллельном вводе пучка в анализатор и оптимальной аксиальной энергии ионов точка фокусировки по оси  $z$  лежит на расстоянии порядка  $r_0$  за входной пластиной. С учетом разброса по поперечным скоростям должна использоваться длиннофокусная линза.

**Четвертая глава** посвящена исследованию фазово-динамических характеристик фильтра масс с параметрическим возбуждением колебаний ионов путем амплитудной модуляции питающих напряжений. В частности, рассматриваются случаи амплитудной модуляции сигналом высокой ( $\nu = 9/10$ ) и низкой частоты ( $\nu = 1/10$ ).

Для всех случаев амплитудной низкочастотной ( $\nu = \omega/\Omega = 1/10$ ) и высокочастотной ( $\nu = \omega/\Omega = 9/10$ ) модуляции как ВЧ напряжения ( $V\cos\Omega t$ ), так и полного питающего напряжения ( $U+V\cos\Omega t$ ) параметр стабильности  $\beta(a, q)$ , рассчитанный за период  $P\pi$ , не всегда определяет частотный спектр колебаний ионов как в случае первой области стабильности.



**Рис. 6.** Величины аксептансов  $S_x$  и  $S_y$  (ограниченных контурами площадей), их произведения  $S_x S_y$  от числа  $n_f$  периодов пребывания ионов в краевом поле, а так же влияние времени  $n_f$  пролета ионами краевого поля на коэффициент пропускания  $T$ ;  $a=0.2331$ ,  $q=0.69965$ .



**Рис. 7.** Влияние фазы  $\xi_0$  влёта ионов в ВЧ поле на коэффициент пропускания  $T$  фильтра масс ( $\alpha=0$ ).

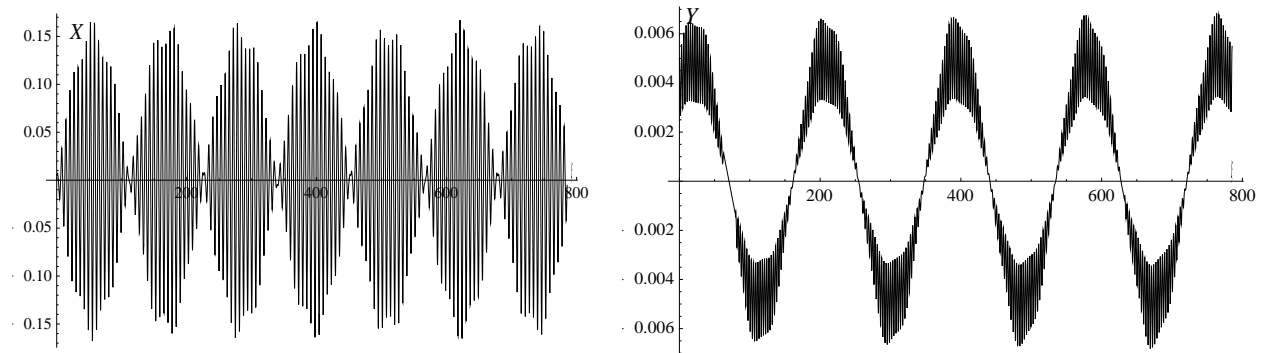
Структура контуров пропускания, характеризующая аксептанс КФМ в острове стабильности, аналогична структуре контуров в первой области стабильности. На рис. 6 показаны изменения аксептанса КФМ

(площадей, ограничиваемых контурами) по координатам  $x$  и  $y$ , и коэффициента пропускания  $T$  в зависимости от числа  $n_f$  периодов ВЧ поля пребывания ионов во входном краевом поле. Видно, что максимум комбинированного аксептанса  $S_x S_y$  соответствует  $n_f \approx 3$  и приблизительно совпадает с максимумом пропускания  $T$ , определенного прямым траекторным методом.

Для всех случаев амплитудной модуляции наличие краевых полей приводит к возрастанию аксептанса КФМ (площади контура) при небольших временах пребывания ионов в краевом входном поле.

Распределение плотности ионов при работе в островах стабильности локализуется вблизи координаты  $x$ .

В главе V представлены результаты исследования фазовой и частотной модуляции питающих напряжений КФМ. Представлены результаты исследования ионно-оптических свойств острова стабильности на основе описания движения ионов в фазовом пространстве, создаваемого частотной или фазовой модуляции ВЧ напряжения. Тип модуляции определяется исключительно способом технической реализации. Из широкого спектра условий частотной модуляции выделяются случаи низкочастотной ( $\nu = 1/10$ ) и высокочастотной модуляции ( $\nu = 9/10$ ).

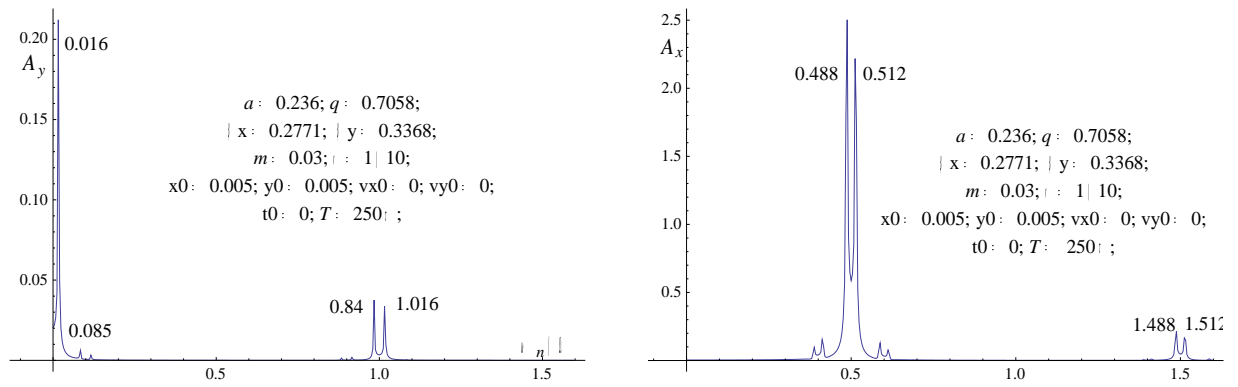


**Рис. 8.** Траектории ионов в острове стабильности ( $\nu = 1/10$ ,  $m=0.03$ ) в точке  $a=0.236$ ,  $q=0.5058$  начальными условиями:  $x(0)=y(0)=0.005r_0$ ;  $v_x(0)=v_y(0)=0$ ;  $\xi_0=0$ ,  $\alpha=0$ . Частотная модуляция.

Частотный спектр колебаний по координате  $x$  содержит мощный дублет гармоник с близкими частотами, симметрично расположенными относительно частоты  $\Omega/2$ , что и определяет вид колебаний в форме биений (рис.8). По координате  $y$  доминируют низкочастотные гармоники с частотами, близкими к нулевой частоте. Структура спектра (рис. 9) отражается эмпирически определенной формулой:

$$\omega_n/\Omega = |\pm n + \beta/2 \pm k\delta(a,q)/2P|, \quad n, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где  $\beta_x = P/(P-1)$  и  $\beta_y = 1/P$ , и  $\omega/\Omega = k/P$ - простая несократимая дробь,  $k$  и  $P$  – целые числа,  $k < P$ ,  $\omega$  – частота модулирующего гармонического сигнала,  $\Omega$  – частота рабочего ВЧ напряжения.



**Рис. 9.** FFT спектры колебаний по координатам  $x$  и  $y$  для траекторий ионов.

Величина  $\delta$  в соответствии с уравнением (12) должна удовлетворять условиям (**рис. 9**):

$$\begin{aligned} n=0: 0.45-k\delta/20=0.512, k\delta=1.24; \\ n=-1; 0.55-k\delta/20=0.488, k\delta=1.24; \\ n=1; 1.45-k\delta/20=1.512, k\delta=1.24; \\ n=2; 1.55-k\delta/20=1.488, k\delta=1.24. \end{aligned}$$

При  $k=4$  величина  $\delta=0.31$  наиболее близка к параметру стабильности  $\beta'_x=0.277$ .

Аналогично для  $y$ -колебаний получаем ( $\beta_y = 1/P = 1/10$ ):

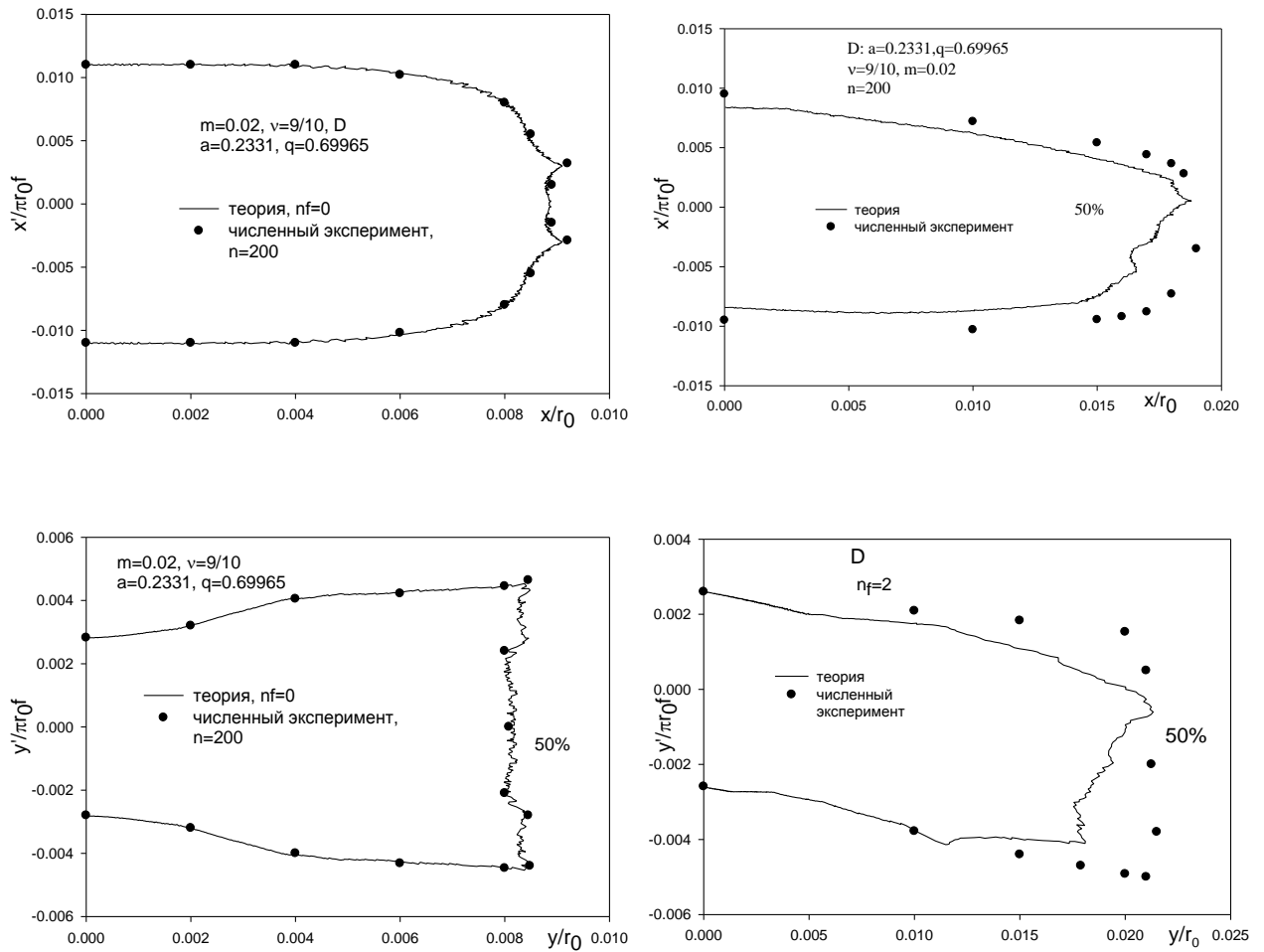
$$\begin{aligned} n=0: 0.05+k\delta/20=0.016, k\delta=0.66; \\ n=-1; 0.95-k\delta/20=1.016, k\delta=0.66; \\ n=1; 1.05-k\delta/20=0.984, k\delta=0.66; \end{aligned}$$

При  $k=2$  величина  $\delta=0.33$  наиболее близка к параметру стабильности  $\beta'_y=0.337$ .

Имеются значительные различия в величине аксептанса при частотной модуляции: при низкой частоте модулирующего сигнала  $\omega = \Omega/10$  аксептансы по координатам  $x$  и  $y$  по величине соответствуют друг другу и поэтому в практическом плане, выгодно использовать низкочастотную фазовую модуляцию. Максимум комбинированного аксептанса по координатам  $x$  и  $y$  соответствует аксиальной кинетической энергии ионов, когда они проходят область ( $z_f=1.5r_0$ ) входного краевого поля за время, равное приблизительно трем периодам ВЧ напряжения ( $n_f=3$ ).

Плотность ионов по сечению пучка возрастает в приосевой области фильтра масс, пучок ионов сжат по оси  $x$ .

**В шестой главе** производится проверка положений теории аксептанса и обоснование научных положений.



**Рис. 10.** 50% контуры пропускания для координат  $x$  и  $y$  при работе в верхней вершине  $D$  острова стабильности в точке  $a = 0.2331, q = 0.69965$  с параметрами  $m = 0.02$  и  $\nu = \omega/\Omega = 9/10$  и амплитудной модуляцией ВЧ напряжения. Сплошным кривым соответствует теоретический расчет акцептанса КФМ, точкам – численный эксперимент.

Имеет место хорошее согласие теории акцептанса и численного эксперимента, когда ионы пролетают краевое поле за малое время ( $n_f = 0$ ), что иллюстрируется на **рис. 10**. Точками на контурах отмечены величины пропускания (50%), определенные по 2000 траекториям ионов при 100 равномерно распределенных начальных фазах на интервале  $0-10\pi$ . Начальные координаты и скорости на фазовой плоскости рассчитаны из условия, что 50% ионов будут иметь амплитуду колебаний менее  $r_0$  и достигнут детектора. Рабочая точка  $a, q$  соответствует относительно высокой разрешающей способности  $R_{0,1}=2700$  и поэтому область допустимых начальных условий влета ионов в анализатор мала. Закономерность такова, что с увеличением полосы пропускания  $\Delta q$  (уменьшением разрешающей способности  $R=q/\Delta q$ ) контуры пропускания подобны (или конгруэнтны) и площадь (величина акцептанса) возрастает.

При наличии краевых полей ( $n_f=2$ , **рис. 10**) обнаруживается расхождение с теоретической моделью акцептанса КФМ. Площадь, ограничивае-

мая теоретическим контуром, меньше, чем в случае определения с помощью прямого траекторного метода. Поскольку теория акцептанса КФМ без краевых полей согласуется с экспериментом, то поиск расхождения следует искать в адекватности модели краевых полей.

Эмпирически определенная структура частотного спектра колебаний ионов (научное положение 3) через параметр стабильности  $\beta$  *невозмущенной* зоны стабильности основывается на том, что ион подвержен действию со стороны мощного основного ВЧ поля. Наличие дополнительного возмущающего поля приводит к появлению дополнительных слабых гармоник с хорошо выраженной структурой частотного спектра. Основные гармоники колебаний ионов определяется условиями движения вблизи рабочей вершины первой области стабильности.

Точное нахождение частотного спектра периодических колебаний ионов в островах стабильности требует аналитического решения уравнений (4) при  $z_f=0$  и представляет самостоятельную задачу.

## **Заключение**

В работе развит и представлен метод расчета акцептанса квадрупольного фильтра масс в островах стабильности, создаваемых параметрическим резонансным возбуждением. Справедливость метода подтверждена прямым расчетом коэффициента пропускания при начальных условиях, соответствующих акцептансу (контур на фазовой плоскости) и определенному уровню пропускания. Развитый подход позволил установить структуру изменения параметров А, В и Г эллипсов захвата, определить оптимальный интервал начальной фазы влета ионов в ВЧ поле, найти величину оптимальной аксиальной энергии ионов при наличии краевых полей. Использование метода Быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволило установить структуру частотного спектра колебаний ионов в изучаемых островах стабильности. В результате стало возможным решение технической задачи оптимального согласования иммитанса источника ионов и акцептанса КФМ путем расчета источника ионов и входной ионной оптики.

## **Основные результаты работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Коненков Н.В., Корольков А.Н., Страшнов Ю.В. Акцептанс и пропускание квадрупольного фильтра масс с амплитудной модуляцией высокочастотного напряжения с учетом краевого поля // Журнал технической физики. - 2010. – Т. 80.– № 9. – С. 110-117.
2. Коненков Н.В., Корольков А.Н., Черняк Е.Я., Страшнов Ю.В. Квадрупольный фильтр масс с малой низкочастотной гармоникой элект-

- трического поля // Масс-спектрометрия. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 53-60.
3. Коненков Н.В., Махмудов М.Н., Страшнов Ю.В. Акцептанс квадрупольного фильтра масс в верхнем острове стабильности при бигармоническом питании // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 9. – № 5. – С. 95-100.
  4. Коненков Н.В., Страшнов Ю.В., Махмудов М.Н. Динамические характеристики квадрупольного фильтра масс при параметрическом возбуждении колебаний ионов // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 12: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Политех. ун-т.- 2008. – С. 465-466.
  5. Страшнов Ю.В. Акцептанс и пропускание квадрупольного фильтра масс с амплитудной модуляцией высокочастотного напряжения // Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Приоритетные направления современной Российской науки глазами молодых ученых» – Рязань, 2009. – С.423-425
  6. Страшнов Ю.В., Коненков Н.В., Черняк Е.Я. Пропускание и разрешающая способность КФМ при низкочастотном параметрическом возбуждении колебаний ионов // IV съезд ВМСО: Сборник трудов третьей всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». – М.: ВМСО, 2009. – С. 164
  7. Страшнов Ю.В., Коненков Н.В., Махмудов М.Н. Акцептанс КФМ при работе в верхнем острове стабильности // IV съезд ВМСО: Сборник трудов третьей всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». – М.: ВМСО, 2009. – С. 173
  8. Страшнов Ю.В., Чан Лю (Chan Luo). Острова стабильности при  $q=0.9$  создаваемые добавочным ВЧ напряжением // IV съезд ВМСО: Сборник трудов третьей всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». – М.: ВМСО, 2009. – С. 174
  9. Корольков А.Н., Коненков Н.В., Страшнов Ю.В. Акцептанс квадрупольного фильтра масс при параметрическом квадрупольном резонансе возбуждения колебаний ионов // Межвузовский сборник "Электроника". – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 36-43.
  10. Страшнов Ю.В. Контуры пропускания квадрупольного фильтра масс с амплитудной модуляцией ВЧ напряжения // Сборник тезисов четвертой Всероссийской конференции – школы «Фундаментальные



вопросы масс-спектрометрии и ее аналитические применения». – Звенигород: ИНЭПХФ РАН, 2010. – С. 40.

11. Коненков Н.В., Страшнов Ю.В., Махмудов М.Н. Параметрическое резонансное возбуждение колебаний ионов в квадрупольном ВЧ поле // Вестник РГУ имени С.А. Есенина. – Рязань: РГУ. – 2(31)/2011. – С. 135-150.

Подписано в печать 23.12.2011. Бумага офсетная. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Гарнитура Times New Roman. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,8. Тираж 100 экз. Заказ № 476.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»  
390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46

Редакционно-издательский центр РГУ  
390023, г. Рязань, ул. Урицкого, 22