

На правах рукописи



ДЯТЛОВ Роман Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
МАСС-АНАЛИЗАТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ТИПА МОНОПОЛЯРНОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ**

*Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
доцент Мамонтов Евгений Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Волков Степан Степанович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Чиркин Михаил Викторович

Ведущая организация: Московский физико-технический институт (Государственный Университет)

Защита состоится «22» июня 2010 г. в зале ученого совета, аудитория 235, в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.03 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «15» мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.т.н., профессор



Б. И. Колотилин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Масс-спектрометрические приборы на основе ионных ловушек широко используются для исследования и серийных анализов вещества в науке, технике и производстве. Наиболее сложными и ответственными элементами гиперболоидных масс-спектрометров являются анализаторы и устройства их ВЧ питания. Простые электродные системы более технологичны при изготовлении, сборке и эксплуатации, а также имеют меньшую стоимость. Поэтому актуальной является задача разработки простых, двухэлектродных масс-анализаторов ионов и исследования их аналитических и эксплуатационных характеристик. В работе на основе углубленного изучения свойств решений уравнений Матье-Хилла предлагается и исследуется новый способ разделения заряженных частиц по массам в монополярных гиперболоидных анализаторах с целью создания эффективного масс-спектрометрического прибора нового типа.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование способа масс-разделения ионов в монополярных ВЧ полях с трёхмерным квадратичным распределением потенциала и создание экспериментального образца масс-анализатора типа монополярной ионной ловушки (МИЛ). Требуется решить несколько взаимосвязанных задач, основные из которых:

- исследование механизма разделения ионов по массам вдоль одной координаты в монополярных ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала;
- создание компьютерной модели масс-анализатора типа МИЛ для оптимизации его геометрических и электрических параметров;
- разработка электродных систем для формирования монополярных полей с трёхмерным квадратичным распределением потенциала, оптимизация их параметров и оценка аналитических свойств;
- исследование распределения потенциала в гиперболоидных системах с ограниченными размерами электродов и оценка влияния нелинейных

отклонений поля на аналитические параметры трехмерных монополярных анализаторов;

- разработка методов внешнего ввода ионов в масс-анализаторы типа МИЛ и определение оптимальных условий захвата ионов;

- исследование и разработка экспериментального масс-анализатора типа монополярной ионной ловушки, определение его аналитических возможностей и потребительских характеристик.

Научная новизна выполненных исследований заключается в том, что:

- показана возможность использования однополярных колебаний ионов в ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала в окрестностях границы первой зоны стабильности для разделения заряженных частиц по удельному заряду;

- исследован механизм разделения ионов по массам вдоль одной координаты в монополярных линейных ВЧ полях;

- разработана компьютерная модель масс-анализатора типа монополярной ионной ловушки и оптимизированы её геометрические и электрические параметры;

- разработаны численные модели процессов внутреннего и внешнего фазового ввода ионов в масс-анализатор типа МИЛ;

- экспериментально определены аналитические и эксплуатационные характеристики монополярных гиперболоидных анализаторов с внутренним и внешним фазовым вводом ионов.

Достоверность результатов подтверждается:

- экспериментальными данными тестирования опытного образца анализатора МИЛ и сравнением их с результатами аналитических расчетов и численного моделирования;

- повторяемостью полученных результатов при многократных экспериментах и моделировании на ЭВМ;

- сопоставлением результатов моделирования и экспериментов с литературными данными.

Научно-практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

- созданию компьютерной модели процессов разделения ионов по массам в трёхмерных монополярных линейных ВЧ полях;
- разработке масс-анализатора заряженных частиц типа монополярной ионной ловушки;
- разработке и исследовании экспериментального масс-спектрометра нового типа на основе МИЛ.

Реализация результатов работы.

1. На основе МИЛ разработан экспериментальный масс-спектрометр, который прошел испытания в тресте “Сургут нефтегеофизика” как прибор для газового каротажа в процессе бурения нефтяных скважин.

2. Результаты диссертационной работы использованы в ООО «Шиббо-лет» при разработке конструкции, технологии изготовления и сборки опытного образца масс-спектрометрического прибора с монополярной ионной ловушкой.

3. Результаты исследований используются в научно-исследовательском и учебном процессах: научная составляющая – дальнейшее совершенствование, создание и изучение компьютерных и экспериментальных моделей анализаторов; учебная составляющая - в Рязанском политехническом институте РИ(ф)МГОУ в лекционном курсе по дисциплине «Нетрадиционные методы обработки материалов» рассматривается технология изготовления деталей электрофизическими методами на примере электродной системы монополярного гиперболоидного масс-анализатора типа ионной ловушки.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на втором съезде ВМСО в докладе авторов Е.В. Мамонтова, В.С. Гурова, Р.Н. Дятлова на тему «Масс-селективный анализатор на трехмерном гиперболоидном монополе», Москва, 2005. А также на межвузовской научно-технической конференции РГРТА, Рязань, 2005. По материалам диссертации опубликовано 8 работ, из них 2 патента.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты, полученные в ходе физических экспериментов и компьютерного моделирования, которые выполнены лично автором, а также при его личном участии или под руководством научного руководителя.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит вводную часть, пять глав, заключение и библиографический список литературы. Материал изложен на 148 страницах, включая 79 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 115 наименований.

### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Свойства неотрицательности периодических решений нулевого порядка уравнений Матье-Хилла позволяют осуществлять масс-разделение ионов в монополярных ВЧ полях с трёхмерным квадратичным распределением потенциала в масс-анализаторах из двух гиперболоидных электродов.

2. Аппаратная функция гиперболоидных масс-анализаторов типа монополярной ионной ловушки строго ограничена по нулевому уровню с шириной, обратно пропорциональной квадрату числа периодов ВЧ поля, и интенсивностью, обратно пропорциональной числу периодов ВЧ поля.

3. При оптимальных геометрических и электрических параметрах монополярной ионной ловушки относительное отклонение распределения потенциала от квадратичного в рабочей области не превышает величины  $2 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует достижимой разрешающей способности масс-анализатора  $R=1500$ .

4. Зависимость чувствительности монополярной ионной ловушки с внешним фазовым вводом ионов от амплитуды питающего напряжения имеет пороговый характер с величиной порогового напряжения  $V_{\text{пор}}=120$  В, при котором импульсное ВЧ питание гиперболоидных масс-анализаторов с частотной развёрткой масс становится эффективным.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Вводная часть содержит общую характеристику работы, определяет её актуальность, цели и задачи диссертации. Обоснована научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены сведения об апробации работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет обзор существующих типов динамических и статических масс-анализаторов на основе ионных ловушек для заряженных частиц. Рассматривается их устройство, принцип работы, преимущества и недостатки, области применения. На основе обзора научно-технической литературы по вопросам разработки и использования динамических ионных ловушек в масс-спектрометрии, изучения отечественного и зарубежного опыта выпуска и эксплуатации гиперболоидных масс-анализаторов сделаны выводы о существующих проблемах в данной сфере.

Большинство современных динамических масс-анализаторов при работе используют «буферный» газ, что вносит дополнительные конструктивные элементы в устройство приборов, усложняет процесс их обслуживания, увеличивает стоимость. Анализ показывает, что существуют возможности упрощения электродной системы гиперболоидных масс-спектрометров с сохранением приемлемых аналитических характеристик.

Актуальной задачей является создание предпосылок для дальнейшего развития динамической масс-спектрометрии в области ионных ловушек с целью упрощения конструкции электродных систем приборов и улучшения их потребительских свойств. Современные методы исследования работы динамических ионных ловушек основаны преимущественно на моделировании и численном решении уравнений движения заряженных частиц в электрических полях с помощью ЭВМ, что существенно увеличивает скорость, объём и точность обработки данных. Следовательно, компьютерное моделирование

полезно использовать как одно из эффективных средств решения поставленной задачи.

Вторая глава посвящена рассмотрению процессов разделения заряженных частиц по массам в трёхмерных монополярных анализаторах с квадратичным распределением потенциала и разработке численных моделей для этих процессов.

Известно, что движение заряженных частиц в трёхмерных линейных ВЧ полях по координатам  $z$  и  $r$  описывается двумя дифференциальными уравнениями Матье. Показано, что в окрестностях границы первой зоны стабильности  $a_0(q)$  существуют неотрицательные решения уравнений Матье нулевого порядка  $se_0(\xi, q)$ , свойства которых могут быть использованы для разработки метода разделения ионов по массам вдоль одной координаты в монополярных ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала.

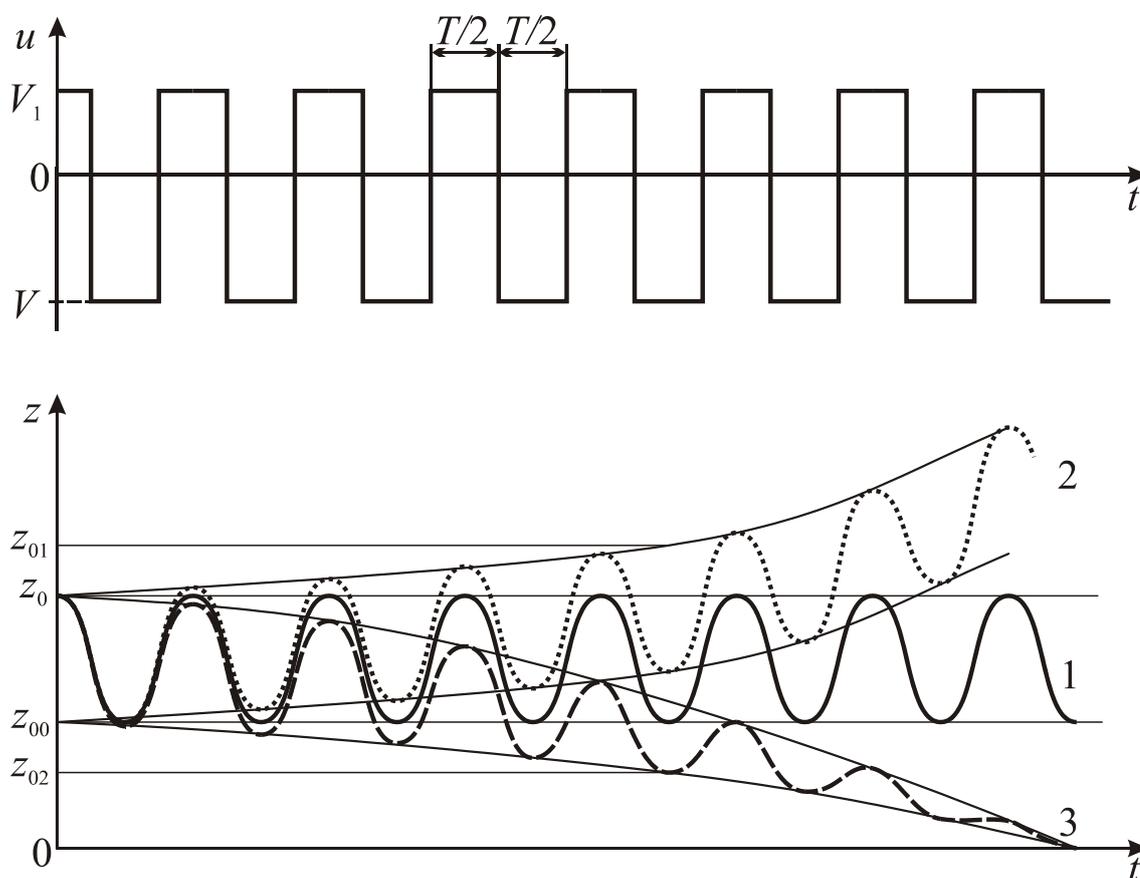


Рисунок 1 - Траектории ионов по координате  $z$ : 1 -  $m=m_0$ , 2 -  $m>m_0$ , 3 -  $m<m_0$

Практический интерес представляет разделение заряженных частиц по массам в трехмерном монополярном гиперболоидном масс-анализаторе при импульсном питающем напряжении прямоугольной формы с частотной развёрткой масс. На рисунке 1 приведены характерные траектории ионов с параметрами  $a$  и  $q$  в окрестностях границы стабильности  $a_0(q)$ , которые показывают возможность осуществления разделения ионов по массам в монополярном пространстве  $0 \leq z \leq z_{01}$ , с квадратичным распределением ВЧ потенциала.

Для оценки аналитических свойств и расчета формы аппаратной функции масс-анализатора с одномерным монополярным разделением ионов по удельному заряду  $e/m$  достаточно знать поведение огибающих траекторий заряженных частиц, которые находятся с помощью метода характерных решений. Огибающие траектории ионов в окрестностях границы стабильности  $a_0(q)$  описываются выражением

$$\begin{cases} Z_1(n) = A \operatorname{ch}(\omega_1 n) + B \operatorname{sh}(\omega_1 n), & m > m_0, \\ Z_2(n) = A \cos(\omega_2 n) + B \sin(\omega_2 n), & m < m_0, \end{cases} \quad (1)$$

где постоянные  $A$ ,  $B$  определяются начальными координатами и скоростями ионов,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – зависят от параметров  $a$  и  $q$ . Используя выражения для огибающих траекторий, можно аналитическими или численными методами решать задачи, возникающие при анализе процесса разделения ионов по массам в монополярных гиперболоидных анализаторах.

Представление о разрешающей способности и чувствительности монополярного одномерного масс-анализатора дают области удержания ионов (рисунок 2). Замкнутый характер областей удержания соответствует ограниченной протяженности массовых пиков по шкале масс. Это является важным свойством одномерного масс-анализатора, вытекающим из особенностей одномерного разделения ионов по массам в монополярном ВЧ поле при фазовом вводе ионов.

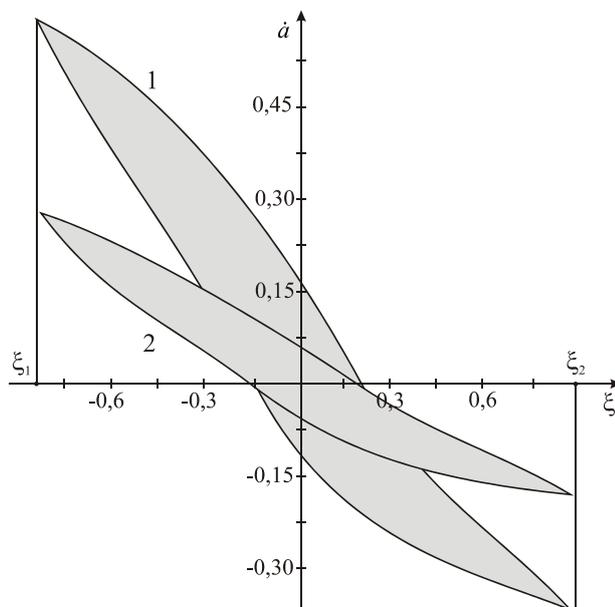


Рисунок 2 - Области удержания ионов при фазах ввода: 1 -  $\xi_{01}=0$ , 2 -  $\xi_{02}=\pi/2$

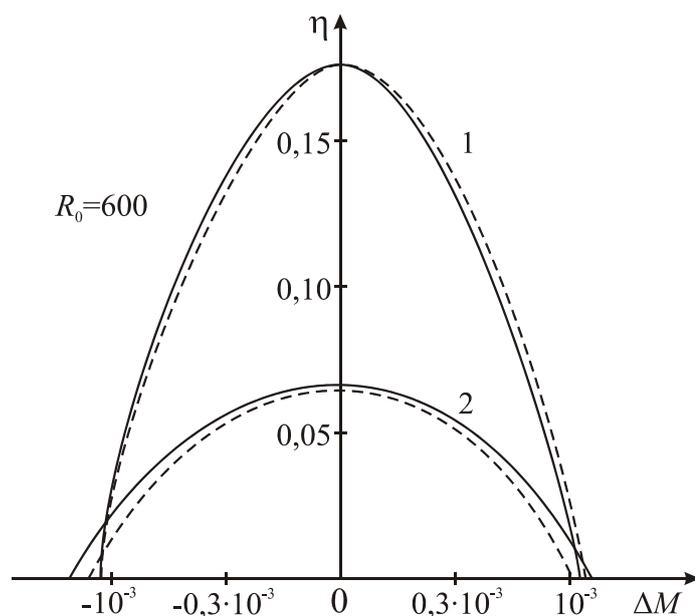


Рисунок 3 - Массовые пики одномерного монополярного масс-анализатора:  $V=250$  В,  $n_c=10$ ,  $c_0=1,2$ ;  $\lambda=0,327$ ; 1, 2 - фазы ввода  $\xi_{01}=0$ ,  $\xi_{02}=\pi/2$ ; сплошная линия - расчет по формулам, пунктир – моделирование

Компьютерное моделирование монополярных гиперболоидных масс-анализаторов заключалось в расчете траекторий движения  $5 \cdot 10^3$  заряженных частиц с равномерно распределенным в объеме  $\Delta r = \pm 0,1r_0$ ,  $\Delta z = 0,1z_{01}$  начальными координатами и тепловыми начальными скоростями, распределенными по нормальному закону. По траекториям ионов строились массовые пики и

определялись аналитические параметры анализатора  $\eta$  и  $R_0$ . Результаты аналитических расчетов и численного моделирования, представленные на рисунке 3, позволяют выделить важные свойства одномерного разделения ионов по массам в монополярных линейных электрических ВЧ полях:

- строго ограниченную протяженность массовых пиков;
- в 2-3 раза более высокую скорость анализа ионов по массам в монополярном гиперболоидном анализаторе по сравнению с другими квадрупольными приборами.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию электрических полей в монополярных гиперболоидных масс-анализаторах. Моделирование позволило определить оптимальную геометрию электродной системы прибора и оценить погрешность распределения потенциала в областях точного и нелинейного полей.

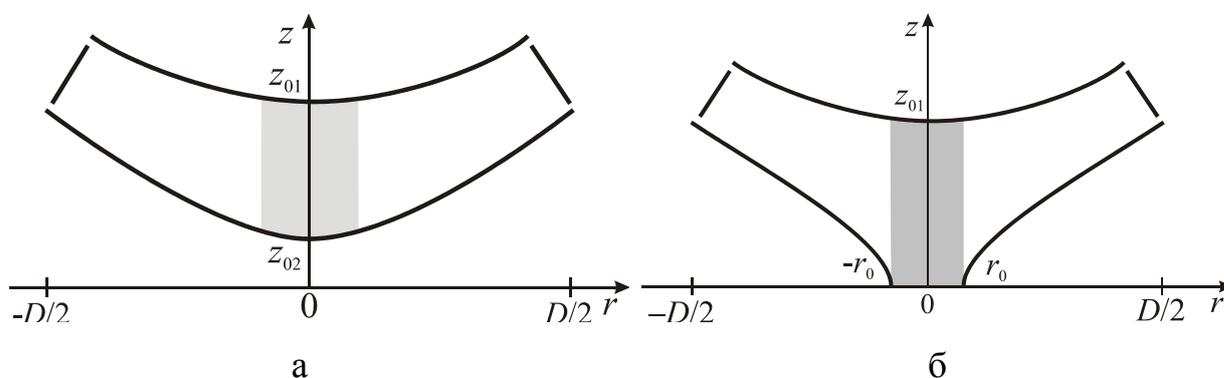


Рисунок 4 - Монополярные анализаторы с трёхмерным квадратичным распределением потенциала с экранирующим электродом: а - гиперболоидный конденсатор; б - монополярная ионная ловушка

Трёхмерное линейное электрическое поле в монополярном пространстве может быть образовано в анализаторах с двумя гиперболоидными электродами. Варианты монополярных анализаторов показаны на рисунке 4. В гиперболоидном конденсаторе реализуется монополярный режим разделения ионов по массам по одной координате в первой зоне стабильности при глу-

бине колебаний  $c_m \leq 2,7$ , а в монополярной ионной ловушке внешний фазовый ввод ионов через отверстие в кольцевом электроде.

Оптимизация геометрических и электрических параметров монополярных гиперболоидных анализаторов осуществлялась с помощью компьютерного моделирования электрических полей при ограниченных размерах электродов. Степень линейности электрического поля оценивалась по нормированному отклонению  $\delta_\phi$  распределения потенциала от квадратичного в рабочих областях анализаторов. Точность расчетов, которая оценивалась путём решения тестовых задач, составила  $10^{-7}$ . Распределение погрешности  $\delta_\phi$  в рабочей области анализатора типа монополярной ионной ловушки приведено на рисунке 5. При оптимальных значениях геометрических и электрических параметров гиперболоидных монополя и конденсатора отклонения распределения потенциала в рабочей области от квадратичного не превышают величины  $\delta_\phi < 10^{-4}$ , что соответствует разрешающей способности  $R > 10^3$ .

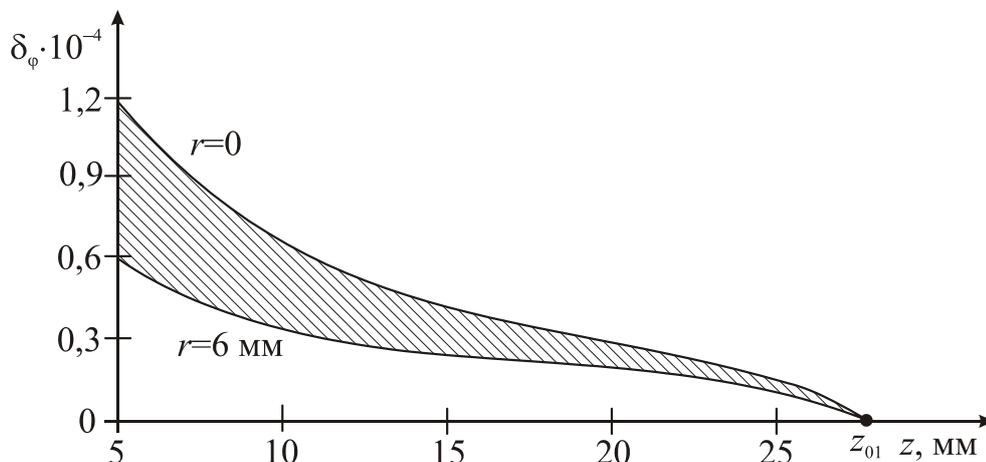


Рисунок 5 - Отклонение потенциала от квадратичного распределения в зависимости от координаты  $z$  в области точного поля в различных сечениях  $r$  монополярной ионной ловушки

Простота конструкции монополярной ионной ловушки с внешним вводом ионов позволяет улучшить технологические и эксплуатационные характеристики масс-анализатора в целом, эффективно решить проблему ввода и

вывода ионов, ослабить процесс образования диэлектрических пленок на по-  
леобразующих электродах.

Четвёртая глава посвящена исследованию масс-селективных свойств  
монополярной ионной ловушки с учётом мультипольных отклонений поля.

В масс-анализаторе типа ионной ловушки с ограниченной плоскостью  
 $z=0$  дополнительные отклонения поля от линейного возникают из-за отвер-  
стия в кольцевом электроде (рисунок 4, б). Рабочая область в таком анализа-  
торе состоит из области точного поля  $r_{01} \leq z \leq z_{01}$  и области нелинейного поля  
 $0 \leq z < r_{01}$ . Траектории движения заряженных частиц в монополярной ионной  
ловушке исследовались с учётом мультипольных отклонений поля с поряд-  
ком  $p=3 \dots 6$ . Траектории ионов в слабонелинейных полях рассчитывались пу-  
тём численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений  
2-го порядка

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} + [a + 2q\psi(\omega t + \varphi_0)] \left( z + \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial z} \right) &= 0, \\ \frac{d^2 r}{dt^2} - \left[ \frac{a}{2} + q\psi(\omega t + \varphi_0) \right] \left( r + \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial r} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta \Phi(r, z)$  – функция отклонения потенциала от квадратичного.

В ВЧ полях с мультипольными составляющими нестабильность траек-  
торий ионов в строгом смысле может нарушаться. В этом случае полезно ис-  
пользовать понятие условно нестабильных ионов с массой  $m > m_c$ , где  $m_c$  –  
масса ионов с периодическими траекториями в нелинейном поле. В слабоне-  
линейном поле масса  $m_c$  является функцией координат ионов при  $p > 2$ . При  
этом граница стабильности  $a_0(q)$  также становится зависимой от координаты  
 $z$ . Для каждого значения координаты  $z$  можно определить текущее значение  
массы  $m_c(z)$ , соответствующее периодической траектории

$$m_c(z) = m_0 \left( 1 + A_p (p-1) \left( \frac{z}{z_{01}} \right)^{p-2} \right), \quad (3)$$

где  $A_p$  – мультипольный коэффициент.

Параметр  $m_c$  при сопоставлении с массой  $m$  анализируемых ионов позволяет определять тенденции развития колебательных процессов при добавлении к линейному полю мультипольных составляющих различного порядка и знака.

По результатам компьютерного моделирования сформулированы закономерности поведения траекторий ионов в окрестности границы  $a_0(q)$  в слабонелинейных ВЧ полях.

1. Для ионов тяжелых масс с увеличением уровня нелинейных искажений и увеличением порядка  $p$  скорость нарастания огибающих траекторий уменьшается, и селективные свойства масс-анализаторов ухудшаются.

2. Масса  $m_c$  ионов с периодическими траекториями не зависит от глубины колебаний, а является функцией начальных координат.

3. Траектории заряженных частиц с массами  $m > m_0$  в слабонелинейных полях с  $A_p > 0$  строго говоря не являются ограниченными.

Результаты моделирования на ЭВМ массовых пиков монополярных гиперболических масс-анализаторов показали, что из-за слабонелинейных отклонений поля возникают:

- смещения положения пиков по шкале масс;
- изменения интенсивности и ширины массовых пиков.

В монополярной ионной ловушке возможен режим внешнего ввода ионов через отверстие в кольцевом электроде. Ионы образуются в пространстве между кольцевым и корректирующим электродами и вводятся в анализатор путем ускорения с последующим захватом ВЧ полем. Определены условия и оптимальные параметры напряжений на электродах анализатора во время ввода и захвата. Наиболее благоприятные фазы ввода  $\xi_{01}=0$  или  $\xi_{02}=\pi/2$ .

Результаты моделирования (рисунок 6) показали, что форма массовых пиков монополярной ионной ловушки при изменении амплитуды питающего напряжения остается постоянной, а интенсивность массовых пиков с увеличением  $V$  растёт до пороговых значений  $V_{\text{пор}}$ , а при  $V > V_{\text{пор}}$  изменяется незначительно. Это является полезным свойством монополярного масс-

анализатора, так как при ограниченных амплитудах ВЧ питающего напряжения достигается предельная для каждого режима масс-разделения ионов чувствительность.

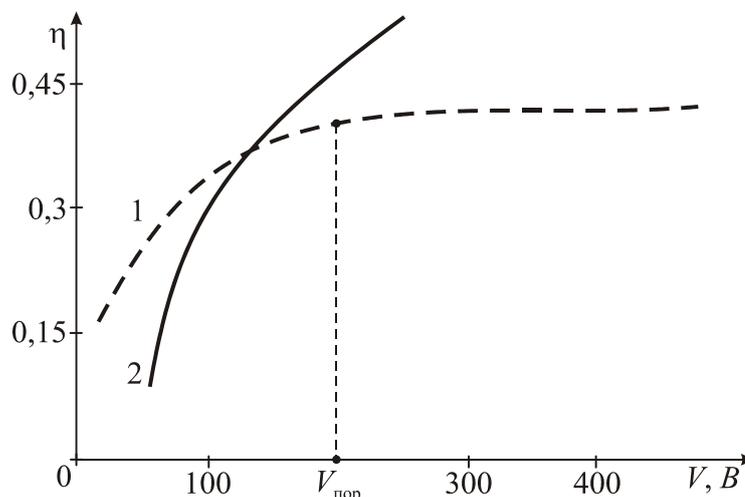


Рисунок 6 - Зависимости относительной интенсивности массовых пиков монополярной ионной ловушки с внешним вводом ионов от амплитуды ВЧ напряжения: 1, 2 - результаты моделирования и эксперимента

В пятой главе приведены результаты исследования экспериментального масс-анализатора типа монополярной ионной ловушки. Достоверность результатов, полученных аналитическим путём и при численном моделировании, была проверена при исследовании экспериментального масс-анализатора с внутренним и внешним вводом ионов. Структурная схема экспериментального прибора показана на рисунке 7.

Гиперболоидная электродная система изготавливалась из нержавеющей стали на станках с ЧПУ с применением электрофизических методов обработки. Сборка электродной части масс-анализатора осуществлялась в лабораторных условиях с точностью 20...40 мкм при размерах электродов  $D=80$  мм. Под действием ленточного пучка электронов осуществлялась генерация ионов с энергиями до 100 эВ. Импульсное питание масс-анализатора ( $V=210$  В) с частотной разверткой масс до 1 МГц имеет стабильность параметров ВЧ напряжения не хуже  $10^{-3}$ .

По результатам обработки экспериментальных спектров в режиме внешнего ввода ионов получена зависимость относительной чувствительности анализатора от амплитуды ВЧ напряжения, которая хорошо согласуется с результатами моделирования (рисунок 6).

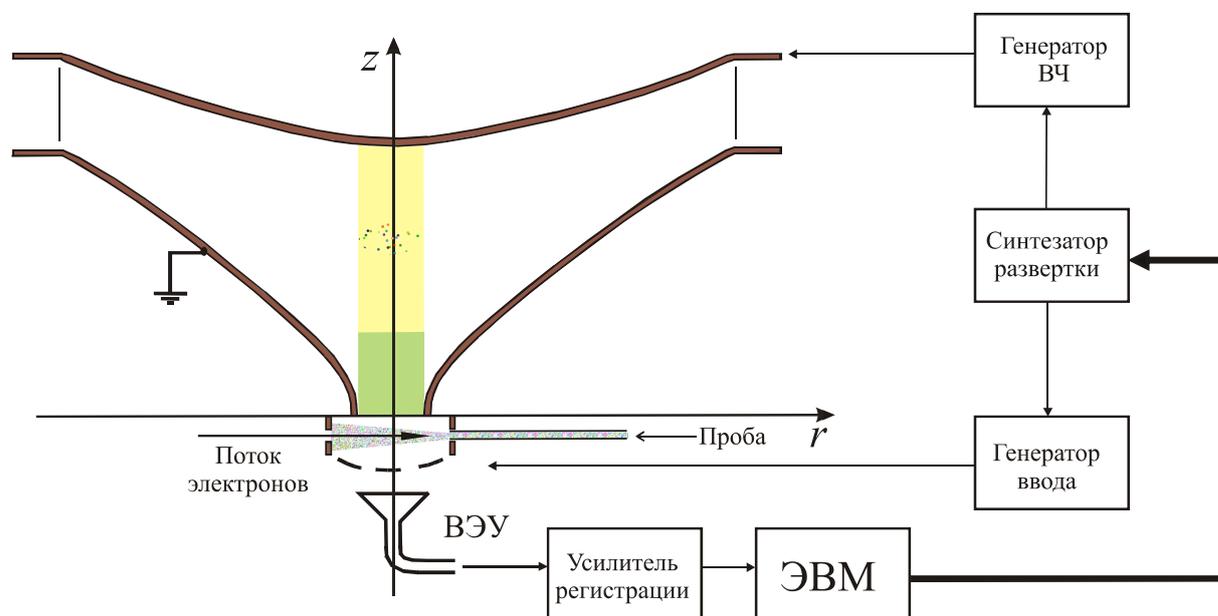


Рисунок 7 - Структурная схема экспериментальной установки для исследования масс-селективных свойств монополярной ионной ловушки с внешним вводом ионов

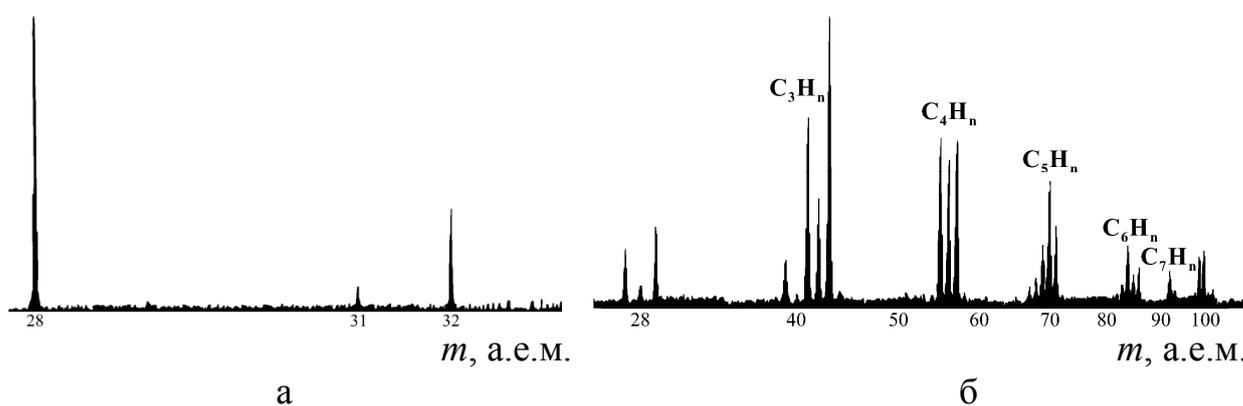


Рисунок 8 – Обзорные спектры: а - остаточной атмосферы; монополярная ионная ловушка с внутренним вводом при  $\lambda=0,32$ ;  $n_c=25$ ;  $R_{0,5}=1400$ ; б - товарного бензина нефтеперерабатывающего завода; монополярная ионная ловушка с внешним вводом при  $\lambda=0,2$ ;  $n_c=25$ ;  $R_{0,5}=200$

На рисунке 8 показаны спектры в двух режимах работы монополярной ионной ловушки – с внутренним и внешним вводом ионов. Разрешение в первом случае составило  $R_{0,5}=1400$ , во втором -  $R_{0,5}=200$ .

На основе монополярной ионной ловушки разработан экспериментальный масс-спектрометр, который прошел испытания в тресте “Сургут нефтегеофизика” как прибор для газового каротажа процесса бурения нефтяных скважин.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследован способ разделения заряженных частиц по массам вдоль одной координаты в монополярных ВЧ полях с трехмерным квадратичным распределением потенциала при фазовом вводе ионов, позволяющий существенно (в 2-3 раза) повысить скорость и эффективность квадрупольных масс-анализаторов.

2. Созданы трёхмерные компьютерные модели монополярных гиперболоидных масс-анализаторов ионов и оптимизированы их геометрические и электрические параметры.

3. Разработан и исследован монополярный масс-анализатор типа ионной ловушки с улучшенными конструкторско-технологическими характеристиками, с внешним фазовым вводом ионов. Достигнутая точность поля в рабочей области анализатора составила  $\delta \leq 2 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует разрешающей способности  $R > 1,5 \cdot 10^3$ .

4. Разработан и испытан в условиях длительного производственного эксперимента трехмерный гиперболоидный масс-анализатор типа монополярной ионной ловушки с внешним фазовым вводом ионов с увеличенным более чем на порядок сроком службы без профилактики и высокой эффективностью масс-анализа при ограниченных амплитудах  $V \leq 120$  В импульсного ВЧ питающего напряжения.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Мамонтов Е.В., Дятлов Р.Н. Способ разделения заряженных частиц по удельному заряду и устройство для его осуществления // Патент на изобретение №2276426 от 14.12.2004.
2. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филипов И.В., Дятлов Р.Н. Способ разделения заряженных частиц по удельному заряду и устройство для его осуществления // Патент на изобретение №2293396 от 03.08.2005.
3. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филипов И.В., Дятлов Р.Н. Время-пролетное разделение ионов по удельному заряду в ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала // ЖТФ.- 2007.- Т.77.- Вып.7.- С.139-142.
4. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Дятлов Р.Н. Масс-селективный анализатор на трехмерном гиперболоидном монополе / Тезисы к докл. II съезда ВМСО // Москва, 2005.
5. Дятлов Р.Н. Моделирование молекулярного потока и распределение давления в вакуумной камере монополярной ионной ловушке с внешним вводом ионов // Межвузовский сборник научных работ "Информационные технологии в электронике". Рязань, РГРТА, 2005.
6. Дятлов Р.Н. Трехмерный анализатор с квадратичным распределением потенциала для времяпролетного масс-спектрометра // Рязань, Сборник научных статей. Рязань, РГРТА, 2005.
7. Дятлов Р.Н. Исследование влияния конструкции анализатора монополярного масс-спектрометра на распределение искажений в полевого пространстве детектора // Межвузовский сборник. Рязань, РГРТА, 2006.
8. Дятлов Р.Н. Влияние энергии влета заряженных частиц на разрешающую способность времяпролетного масс-спектрометра с трехмерным квадратичным распределением потенциала // Сборник научных статей. Рязань, РИ(ф)МГОУ, 2009.

Дятлов Роман Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАСС-АНАЛИЗАТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ТИПА МОНОПОЛЯРНОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 13.05.2010. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 75 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.