

using the theory of water hammer Zhukovsky. These results of analytical calculations have witnessed the negative effects of this type of sensors on the process the fuel, which significantly distorts the basic hydrodynamic characteristics and parameters of the fuel injection process.

Дата надходження в редакцію: 12.05.2012. р.  
Рецензент: д.т.н., професор Лавров Є.А.

УДК 621.384.8

## МАГНИТНЫЕ МАСС-АНАЛИЗАТОРЫ С БОЛЬШОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПОЛЯ

**А.С. Кузема**, д.ф.-м.н., проф., Сумской национальный аграрный университет

**П.А. Кузема**, к.х.н., Институт химии поверхности им. А.А. Чуйка НАН

*Викладено методику та результати теоретичних і експериментальних досліджень іонно-оптичних властивостей і характеристик статичних мас-аналізаторів із магнітним полем великої неоднорідності. Показано перспективність використання таких магнітних полів для аналізу іонних пучків у мас-спектрометрії.*

### Постановка проблемы

Магнитные масс-анализаторы широко используются для анализа состава и свойств веществ и материалов в различных областях науки, техники и технологии. При этом большинство приборов и оборудования, действие которых основано на магнитной сепарации ионов по массам, построено на базе секторных стационарных магнитных и электрических полей, ионно-оптические свойства которых хорошо изучены и возможности их существенного улучшения практически исчерпаны. Очевидно, что проблема дальнейшего совершенствования масс-анализаторов с магнитными полями может быть успешно решена за счет поиска и освоения новых, более эффективных методов разделения и фокусировки ионных пучков. Перспективным в этом аспекте является применение аксиально-симметричных магнитных полей большой неоднородности, свойства и характеристики которых исследуются в данной работе.

### Анализ последних достижений и публикаций

Масс-анализаторы с неоднородным магнитным полем условно можно разделить на две группы: приборы с магнитной фокусировкой ионов по направлению [1-3] и устройства с электрической фокусировкой [4]. Применение электрической фокусировки ионов по направлению обеспечивает масс-анализатору ряд преимуществ, а именно: отпадает необходимость использования сложных криволинейных границ полюсных наконечников магнита и высокой точности сборки элементов ионно-оптической системы; достигается большая дисперсия при сравнительно небольших габаритах магнита; уменьшается влияние пространственного заряда ионного пучка и магнитных полей рассеяния на аналитические параметры прибора. Наряду с этим открывается возможность создания масс-анализаторов с пространственной фокусировкой ионного пучка и очень малыми абберациями [5]. Однако практическая реализация указанных пре-

имуществ требует разработки физических основ конструирования таких масс-анализаторов, что, в свою очередь, выдвигает необходимость глубокого и детального изучения поведения заряженных частиц в секторных магнитных полях, обладающих аксиальной симметрией и большой неоднородностью поля.

Целью данной работы является изучение ионно-оптических свойств и характеристик магнитных масс-анализаторов с большой неоднородностью поля и определение рациональных вариантов системы фокусировки ионного пучка в масс-анализаторах такого класса.

### Методика исследований

Для исследования параметров магнитного анализатора с различной неоднородностью поля нами был выбран простейший вариант магнитного масс-спектрометра. Ионно-оптическая система прибора включала в себя три составляющих элемента: источник ионов с ионизацией пробы электронным ударом, магнитный анализатор и приемник ионов. Геометрические параметры ионно-оптической системы имели следующие значения: радиус центральной траектории ионов  $r_m = 0,05$  м, угол поворота ионов в магнитном поле  $\varphi_m = 270^\circ$ , длина входного плеча  $L_m' = 0,1$  м, длина выходного плеча  $L_m'' = 0,18$  м. В выбранной ионно-оптической системе фокусировка ионов по направлению не осуществлялась, поэтому для уменьшения угловых аббераций использовался ионный пучок с малым углом расходимости. Формирование такого пучка осуществлялось геометрической коллимацией с помощью диафрагмы, установленной на входе в анализатор.

При заданных параметрах ионного пучка (угол расходимости  $2\theta = 0,005$ , относительный разброс энергий ионов  $\Delta U/U = 3 \cdot 10^{-4}$ ) экспериментально исследовалось влияние величины коэффициента неоднородности магнитного поля анализатора на разрешающую способность и чувствительность масс-спектрометра. Изменение величины коэффициента неоднородности магнитного поля анализатора осуществлялось за

счет применения полюсных наконечников с различным углом наклона поверхностей, формирующих поле. Для этого были изготовлены две пары полюсных наконечников, которые обеспечивали в зазоре магнита поле с коэффициентом неоднородности  $n = 1$  или с  $n = 1,5$ .

#### Изложение основного материала исследования

Предварительно теоретически оценивалась величина разрешающей способности для двух вариантов ионно-оптической системы: с магнитным полем типа  $r^{-1}$  и с магнитным полем  $r^{-1,5}$ . При этом предполагалось, что  $L_m' = 0$ , поскольку коллимирующая диафрагма, установленная на входе в анализатор, может рассматриваться как выходная щель источника ионов.

Формула для определения разрешающей способности в первом приближении имеет вид

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{\frac{1}{2} r_m c_{13}}{2(2r_m y_0 |c_{11}| + 2r_m y_0' |c_{12}| + r_m |c_{13}| \beta)},$$

где  $y_0$  – полуширина выходной щели источника ионов в единицах радиуса центральной траектории ионов;  $y_0'$  – угол наклона траектории иона на выходе из источника ионов;  $\beta$  – относительный разброс энергии ионов. Коэффициенты  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  и  $c_{13}$  определяются матричным методом по методике, изложенной в [3]. Для магнитного анализатора с параметрами  $n = 1$ ,  $\varphi_m = 270^\circ$ ,  $L_m' = 0$ ,  $L_m'' = 0,18$  м,  $r_m = 0,05$  м значения этих коэффициентов будут такими:

$$c_{11} = \cos \sqrt{1-n} \varphi_m - \frac{L_m''}{r_m} \sqrt{1-n} \sin \sqrt{1-n} \varphi_m = 1;$$

$$c_{12} = \frac{\sin \sqrt{1-n} \varphi_m}{\sqrt{1-n}} + \frac{L_m''}{r_m} \cos \sqrt{1-n} \varphi_m = 8,31;$$

$$c_{13} = \frac{1 - \cos \sqrt{1-n} \varphi_m}{1-n} + \frac{\frac{L_m''}{r_m} \sin \sqrt{1-n} \varphi_m}{\sqrt{1-n}} = 28.$$

При значениях параметров, характеризующих ионный пучок,  $2y_0 = 0,01$ ,  $2y_0' = 0,005$  и  $v = 3 \cdot 10^{-4}$  разрешающая способность прибора  $\Delta m/m = 120$ . Для магнитного анализатора с полем  $r^{-1,5}$  при всех остальных одинаковых условиях получаем:

$$c_{11} = \cos i\sqrt{0,5} \varphi_m - \frac{L_m''}{r_m} i\sqrt{0,5} \sin i\sqrt{0,5} \varphi_m = 47,7;$$

$$c_{12} = \frac{\sin i\sqrt{0,5} \varphi_m}{i\sqrt{0,5}} + \frac{L_m''}{r_m} \cos i\sqrt{0,5} \varphi_m = 68,2;$$

$$\left[ A \left( 1 - \frac{L_m' + L_m''}{F_{xz}} \right) + L_m' + L_m'' \right] \cos \varphi_m + \left[ A \left( \frac{L_m'' - r_m}{F_{xz}} - \frac{L_m'}{r_m} \right) + r_m - \frac{L_m' L_m''}{r_m} \right] \sin \varphi_m = 0;$$

(2)

$$c_{13} = \frac{1 - \cos i\sqrt{0,5} \varphi_m}{-0,5} + \frac{\frac{L_m''}{r_m} \sin i\sqrt{0,5} \varphi_m}{i\sqrt{0,5}} = 94,2.$$

После подстановки значений этих коэффициентов в формулу для разрешающей способности получим  $\Delta m/m = 30$ .

Экспериментальные исследования зависимости параметров масс-спектрометра от степени неоднородности магнитного поля анализатора проводились при напуске в область источника ионов смеси паров метана и воздуха. Развертка спектра масс осуществлялась изменением ускоряющего ионы напряжения. Максимальная энергия ионов на выходе из источника ионов составляла 2000 эВ. Эксперименты показали, что при одинаковых параметрах ионного пучка разрешающая способность масс-спектрометра с полем  $n = 1,5$  в 2,5 раза, а чувствительность в 2 раза меньше, чем у масс-спектрометра с полем  $n = 1$ . Необходимо отметить, что, хотя дисперсия анализатора с полем  $r^{-1,5}$  в три раза больше дисперсии анализатора с полем  $r^{-1}$ , абберационные эффекты, обусловленные дефокусирующим действием поля  $r^{-1,5}$  не позволяют реализовать это преимущество. Оно может быть реализовано в определенной мере при наличии фокусировки ионов по направлению, а при большой энергетической неоднородности ионного пучка – по направлению и скорости.

Фокусировку ионов по направлению в масс-анализаторе с коэффициентом неоднородности  $n = 1$  можно осуществить двумя способами: с помощью криволинейных границ магнитного поля или с помощью электростатической линзы или системы линз в случае прямых границ магнитного поля масс-анализатора. Второй способ предпочтительнее, поскольку при этом фокусировка ионов по направлению осуществляется в большом диапазоне изменений физических и геометрических параметров масс-анализатора, а влияние полей рассеяния и пространственного заряда устраняется электрической регулировкой параметров фокусирующей системы.

В масс-анализаторе с полем  $r^{-1}$  для повышения разрешающей способности и чувствительности масс-спектрометра может быть обеспечена пространственная фокусировка ионного пучка (в радиальной и аксиальной плоскостях). Соотношения для радиальной и аксиальной фокусировки ионного пучка имеют соответственно следующий вид:

$$\frac{1}{F_{xy}} = \frac{1}{A} + \frac{1}{L_m' + r_m \varphi_m + L_m''};$$

(1)

где  $A$  – расстояние от источника ионов до фокусирующей линзы;  $F_{xy}$  и  $F_{xz}$  – фокусные расстояния линзы в радиальной и аксиальной плоскостях.

Из приведенных уравнений следует, что радиальная фокусировка ионов по направлению осуществляется только электрическим полем линзы, а аксиальная – электрическим полем линзы и магнитным полем призмы. Поэтому для фокусировки ионов по двум направлениям фокусные расстояния  $F_{xy}$  и  $F_{xz}$  должны быть различны. Величины этих фокусных расстояний определяются из условий фокусировки по направлению (1) и (2).

Экспериментальные исследования масс-анализатора с магнитным полем  $g^1$  и электрической фокусировкой ионов по направлению выполнялись на масс-спектрометре, в котором функцию разделения ионов по массам выполнял масс-анализатор с параметрами:  $n = 1$ ,  $r_m = 0,1$  м,  $L_m' = 0,18$  м,  $\varphi_m = 270^\circ$ ,  $L_m'' = 0$ ,  $A = 0,32$  м. В качестве фокусирующей системы экспериментального масс-спектрометра использовалась одиночная электростатическая линза, состоящая из трех цилиндрических электродов, крайние из которых были соединены с корпусом масс-спектрометра, а на средний подавался регулируемый положительный потенциал [4].

Для создания ионного пучка использовался щелевой источник ионов с ионизацией молекул исследуемого вещества электронным ударом. Ширина выходной щели источника ионов  $S_1 = 0,0001$  м, начальный разброс энергий ионов  $\Delta U/U = 10^{-3}$ . Принимая во внимание, что при выбранных параметрах масс-анализатора дисперсия  $D_m = r_m \varphi_m^2 / 4$ , а геометрическое увеличение  $M = -2$ , была вычислена разрешающая способность прибора с учетом aberrаций первого порядка. Она оказалась равной

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{D_m}{2|M|S_1 + D_m \frac{\Delta U}{U}} = 370.$$

Исследование основных характеристик масс-спектрометра проводилось при напуске в источник ионов смеси криптона и воздуха. Юстировка прибора заключалась только в подборе оптимального режима источника ионов и соответствующего потенциала среднего электрода электростатической линзы. Никаких механиче-

ских перемещений электромагнита масс-анализатора и других узлов ионно-оптической системы не требовалось. Максимальная разрешающая способность масс-спектрометра с одиночной электростатической линзой при энергии ионов  $U = 2,6$  В и ширине щели приемника ионов  $S_2 = 0,0004$  м была 570 на уровне 10% высоты пиков спектра масс. Это почти в четыре раза выше величины разрешающей способности масс-спектрометра с однородным магнитным полем и таким же радиусом центральной траектории ионов.

Дальнейшее улучшение аналитических параметров масс-спектрометра с полем  $g^1$  и электрической фокусировкой ионов по направлению было достигнуто за счет применения более совершенной фокусирующей системы. Вместо одиночной линзы между источником ионов и масс-анализатором была установлена фокусирующая система из квадрупольно-октапольных линз. Разрешающая способность масс-спектрометра после этого возросла до 800, а чувствительность увеличилась в три раза. Режим работы ионного источника и начальные параметры ионного пучка не изменялись. Улучшение характеристик масс-спектрометра достигнуто за счет коррекции сферической aberrации и более эффективной по сравнению с одиночной линзой фокусировкой ионов в аксиальной плоскости. Аналитические параметры масс-спектрометра при его эксплуатации были стабильны во времени.

### Выводы

В итоге выполненных исследований установлены ионно-оптические свойства и характеристика магнитных масс-анализаторов с большой неоднородностью поля. Показано, что применение в таких системах электрической фокусировки ионов по направлению или ее сочетание с магнитной является простым и удобным средством улучшения их характеристик. Определены рациональные варианты конструкции масс-анализаторов с магнитным полем большой неоднородности и электростатических фокусирующих систем к ним. Полученные в работе результаты подтверждают перспективность практического применения магнитных полей большой неоднородности для анализа ионных пучков в масс-спектрометрии.

### Список використаної літератури:

1. Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. – М.: Атомиздат, 1977. – 302 с.
2. Шеховцов Н.А. Магнитные масс-спектрометры. – М.: Атомиздат, 1971. – 232 с.
3. Кузема А.С., Савин О.Р., Чертков И.Я. Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 288 с.
4. Кузема А.С., Соловьева А.Е. // Вісник СНАУ 1(17) 2008, С. 156-160.
5. Шпак Е.В., Явор С.Я., Савин О.Р., Кузема А.С. // Журн. техн. физики 39(9) 1969, С. 1720-1723.

*Изложены методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований ионно-оптических свойств и характеристик статических масс-анализаторов с магнитным полем большой неоднородности.*