

# Специализированный времяпролетный масс-спектрометр ЭМГ-40-2 для анализа водородно-гелиевых тритийсодержащих газовых смесей

Н.Н. Аруев<sup>а</sup>, В.Т. Ждан<sup>б</sup>, А.В. Козловский<sup>б</sup>,  
С.Н. Марковский<sup>б</sup>, И.И. Пилюгин<sup>а,б,\*</sup>

<sup>а</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия. E-mail: i.pilyugin@mail.ioffe.ru

<sup>б</sup> ЗАО «МЕТТЕК», ул. Гжатская 27, 195220 Санкт-Петербург, Россия. E-mail: manage@mettek.ru

Поступила в редакцию 22.05.2008 г.; после переработки – 03.10.2008 г.

Впервые разработан и построен времяпролетный масс-спектрометр малых габаритов с повышенной разрешающей способностью в области легких масс. Прибор предназначен для непрерывного анализа топливных тритийсодержащих газовых смесей термоядерного реактора, в частности международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР.

**Ключевые слова:** ИТЭР, времяпролетный масс-спектрометр, легкие массы, разрешающая способность на уровне 10 % высоты пика.

A new small time-of-flight mass spectrometer with increased resolving power in low mass region is designed and built. The instrument is suitable for on-line analysis of tritium containing fuel gas mixtures from thermonuclear reactors, ITER in particular.

**Keywords:** ITER, time-of-flight mass spectrometer, light masses, resolving power at 10 % of peak height.

## Введение

Для создания термоядерных реакторов, в частности международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) [1], необходимо решить задачу непрерывного точного химического и изотопного анализа водородно-гелиевых тритийсодержащих газовых смесей. Примесями в топливной смеси являются протий, гелий-3, гелий-4, кислород и оксиды различных элементов, углеводороды, азот и его производные, неон, аргон и др. Концентрации примесей в топливной смеси могут лежать в диапазоне от  $10^{-3}$  об. % до единиц об. %. Подобный контроль состава газовых смесей также необходим при насыщении титановых или циркониевых мишеней для нейтронных генераторов, при контроле трития на атомных станциях особенно с реакторами, работающими на тяжелой воде, при утилизации и хранении больших количеств трития и т. д.

Известно, что из всех существующих методов анализа газовых смесей наиболее универсальным, надежным и точным является масс-спектрометрический метод.

Требования, предъявляемые к масс-спектрометрам для таких газовых анализов, детально рассмотрены в работах [2, 3]. Для полного разделения всех компонентов водородно-гелиевых смесей разрешающая способность этих приборов на уровне (5–10) % высоты массовой линии должна быть не менее 3000. При этом дублет  ${}^3\text{H}^+ - {}^3\text{He}^+$  не

будет разрешен. Но проведенные рассмотрения [3] показывают, что достаточно надежные результаты анализа этих смесей могут быть получены при разрешающей способности  $R_{(5-10)\%h} \cong 500$ .

Наличие в топливных смесях радиоактивного трития не позволяет использовать для проведения анализов магнитные статические, магнитные резонансные, омегатронные или квадрупольные масс-спектрометры, детектирующие системы которых работают в непрерывном режиме, из-за увеличения на несколько порядков темновых токов ВЭУ или МКП [4]. Для решения этой задачи можно использовать указанные масс-спектрометры либо с детекторами типа цилиндра Фарадея, либо со специализированными детекторами, устраняющими влияние распада ядер трития, адсорбированных на стенках прибора, на измеряемые токи ионного сигнала, например [5].

Кроме требований по разрешающей способности масс-спектрометр должен обладать высокой чувствительностью и быстродействием, иметь большой динамический диапазон и работать длительное время (месяцы) в автоматическом режиме, который включает в себя градуировку масс-спектрометра, подачу пробы, подстройку спектра, непрерывную компьютерную диагностику состояния всех модулей и узлов прибора, а также информационный обмен с локальными сетями.

На наш взгляд, наиболее перспективными приборами для анализа топливной смеси термоядерного реактора являются времяпролетные

масс-спектрометры типа масс-рефлектор [6], детектирующая система которых работает в режиме синхронного детектирования, т. е. детектор регистрирует ток только тогда, когда приходит ионный пакет. Поскольку длительность ионных пакетов составляет единицы наносекунд, то вклад темного тока от  $\beta$ -распада трития (период полураспада  $T_{1/2} \approx 4 \times 10^8$  с) в регистрируемый сигнал даже при длительной работе прибора с тритием является пренебрежимо малым [3]. Проведенные авторами эксперименты [7] подтвердили, что наличие в газовой смеси радиоактивного трития не приводит к заметному увеличению фонового сигнала в масс-рефлекторе, если детектирующее устройство на основе МКП работает в синхронном режиме. Кроме того, времяпролетные масс-спектрометры имеют высокую экспрессность анализа, просты и надежны в эксплуатации, относительно дешевы и могут длительные периоды времени работать в автоматическом режиме, что важно для проблемы УТС.

Использование масс-рефлекторов для анализа водородно-гелиевых смесей было невозможно до недавнего времени, так как разрешающая способность времяпролетных масс-спектрометров небольших габаритов ( $< 1$  м в длину) в области легких масс не превышала 150–200, что обусловлено принципом действия этих приборов и физическими процессами, происходящими в них. Известны работы, описывающие времяпролетные масс-спектрометры с разрешающей способностью в 20 000–30 000 [8] и даже в 300 000 [9] на уровне 10 % для тяжелых масс. Однако при переходе к конструированию прибора для анализа водородно-гелиевых смесей приходится использовать для ионизации источники ионов с электронным ударом, так как ни лазер, ни поверхностно-ионизационный источник не позволяют ионизовать газы с большой энергией ионизации, что приводит к резкому увеличению размеров облака ионизованных частиц, а значит и к уменьшению разрешающей способности. Поэтому совершенно не ясно, какую разрешающую способность имеют эти приборы в области легких масс. Габариты, сложность и уникальность приборов [8, 9] не позволяют использовать их в промышленных условиях.

## Теоретическая часть

Разрешающая способность на половине высоты пика времяпролетных масс-спектрометров выражается формулой  $R = T/\Delta T$ , где  $T$  – время движения ионов от источника до детектора, а  $\Delta T$  – длительность ионных пакетов в плоскости входа в детектор. Рассмотрим факторы, снижающие разрешающую способность времяпролетного масс-спектрометра с электронной ионизацией. Так как время пролета  $T$  пропорционально корню квадратному из массы иона, а  $\Delta T$  зависит от aberrаций прибора и не может быть меньше времени отклика детектора на приход одного иона,

которое практически не зависит от массы иона, то с уменьшением массы ионов уменьшается разрешающая способность.

На рис.1 представлена схема такого прибора. Он состоит из двухзорового источника ионов, отражателя и детектора, последовательно расположенных вдоль траектории пролета ионов. Такая конструкция впервые была предложена в работе [6]. Ионизация осуществляется импульсно в течение 0.5 мкс в первом зазоре источника ионов электронным пучком шириной  $\sim 1$  мм с энергией электронов 70–100 эВ.

Поскольку при определенной температуре тепловая скорость ионов обратно пропорциональна корню квадратному из массы иона, легкие ионы за время ионизации успевают занять больший объем  $V = \Delta x \Delta y \Delta z$  ионизационного зазора, чем тяжелые. Следовательно, начальная ширина пакета легких ионов  $\Delta x$  больше, чем тяжелых, что приводит к существенному уширению спектральной линии. Увеличение  $\Delta x$ , кроме того, приводит к увеличению начального разброса легких ионов по энергиям  $\Delta U$  по сравнению с тяжелыми ионами. При развороте ионов фронтом выталкивающего импульса легкие ионы получают еще больший разброс по энергиям  $\Delta U$  на выходе из источника, что также приводит к дополнительному уширению спектральной линии. Оба фактора вместе (увеличение  $\Delta x$  и  $\Delta U$ ) приводят к снижению разрешающей способности прибора в области легких масс по сравнению с тяжелыми.

Рассмотрим влияние aberrаций на разрешающую способность времяпролетного прибора. Отдельные aberrации можно оценить, вычисляя корень квадратный из среднеквадратичного отклонения по aberrационному фактору от среднего значения функции времени пролета одиночного иона в приборе. Верхнюю оценку суммарной aberrации можно получить, суммируя отдельные уширения спектральной линии [10] ( $\Delta T_k$ ):

$$(\Delta T) = (\Delta T_1) + (\Delta T_2) + \dots + (\Delta T_i) + \dots + (\Delta T_k). \quad (1)$$

Для случайных и независимых в статистическом смысле aberrаций  $(\Delta T_1) \dots (\Delta T_i)$  указанная оценка (1) является завышенной. В этом случае суммарная aberrация ( $\Delta T_{\text{случ}}$ ) есть корень квадратный из дисперсии [11]. Дисперсия же есть сумма отдельных дисперсий [12]:

$$(\Delta T_{\text{случ}})^2 = (\Delta T_1)^2 + \dots + (\Delta T_i)^2. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1), получим:

$$(\Delta T) = \sqrt{(\Delta T_{\text{случ}})^2} + \dots + (\Delta T_k),$$

и в оценке суммарной aberrации времяпролетного прибора уширение спектральной линии существенно уменьшится, так как для времяпролетного прибора характерно большое количество случайных независимых aberrаций. Это такие aberrационные факторы, как разброс места старта ионов, глубина входа микроканальных пластин, рассеяние ионов на сетках прибора и т. д. В [10] показано, что та-

ких факторов может быть до десяти. Кроме того, по той же формуле (2) можно учитывать и уширение спектральной линии, связанное с конечным временем отклика микроканальной пластины на приход отдельного иона [11], поскольку отклик описывается гауссианом. Итоговая формула для расчета разрешающей способности времяпролетного прибора на половине высоты массового пика имеет вид:

$$R = \frac{T}{\sum_i \Delta T_i} = \frac{T}{\sum_i \Delta T_i + \sqrt{\sum_j (\Delta T_j)^2}} = \frac{1}{\sum_i 1/R_i + \sqrt{\sum_j (1/R_j)^2}}, \quad (3)$$

где  $T$  – полное время пролета иона от источника до детектора, а  $1/R_i = \Delta T_i/T$ . Из формулы (3) видно, что разрешающая способность времяпролетного прибора  $R$  сложным образом зависит от разрешающей способности  $R_i$  по  $i$ -тому абберационному фактору. Каждая из  $R_i$  ависит от большого числа физических параметров прибора, поэтому непосредственно использовать формулу (3) для оптимизации масс-спектрометра затруднительно. Для практических целей формула (3) используется следующим образом. Строится иерархия разрешающих способностей  $R_i$  по принципу  $R_1 \leq R_2 \leq \dots \leq R_k$ . Так как влияние  $R_1$  на общую разрешающую способность  $R$  является доминирующим, физические параметры задачи меняются таким образом, что  $R_1$  возрастает. Аналогичная операция продельвается с  $R_2$ ,  $R_3$  и т. д. При этом должен соблюдаться принцип, что в каждый момент повышается самая маленькая по численному значению разрешающая способность  $R_i$ . Опыт показывает, что  $R_i$  редко объединяются в группы из более, чем двух-трех абберационных факторов с близкими численными значениями разрешающих способностей.

Второй принцип использования формулы (3) для конструирования времяпролетного прибора состоит в том, что траектория движения ионов в приборе может быть разбита на два участка: от источника ионов до первого фокуса, расположенного между источником и отражателем, и от первого фокуса до второго фокуса, расположенного в плоскости детектора. Второй участок содержит отражатель. Задача расчета решается с конца. Сначала рассчитывается отражатель и начальные условия на фазовый объем в первом фокусе, а потом подбираются параметры источника, создающие элементы фазового объема  $\Delta x$ ,  $\Delta U$  в фокусе источника.

Нами была предложена и реализована методика расчета параметров отражателя, обеспечивающая оптимальную фокусировку ионов с заданным энергетическим разбросом ионов  $\Delta U$  (точнее, с заданным отношением  $k = U_{\max}/U_{\min}$ , где  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  – максимальная и минимальная энергия фокусируемых ионов). В отличие от отражателя Мамырина [13, 14], условия фокусировки не требуют совпадения корней первой и второй производных, а необходимо только попадание этих корней в промежуток между  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$ . Это позволяет подобрать параметры отражателя так, что, по крайней

мере, в 2 раза увеличивается численное значение разрешающей способности по фактору компенсации энергетического разброса ионов. Для расчетов используется безразмерная часть  $f$  функции времени пролета одиночного иона через отражатель:

$$t = \sqrt{\frac{m}{2q}} \frac{L_{dr}}{\sqrt{U_T}} f(k, \lambda, \mu, \nu; y), \quad (4)$$

где  $m$  и  $q$  – масса и заряд иона соответственно;  $L_{dr}$  – величина дрейфового промежутка;  $U_T$  – потенциал на тормозящей сетке;  $k = U_{\max}/U_{\min}$  – энергетический разброс ионов;  $\lambda = d_T/L_{dr}$ , где  $d_T$  – величина тормозящего зазора отражателя;  $\mu = d_{otr}/L_{dr}$ , где  $d_{otr}$  – величина отражающего зазора отражателя;  $\nu = U_{otr}/U_T$ , где  $U_{otr}$  ( $U_{\max}$ ) – потенциал на отражающей сетке;  $y \equiv U/U_T$ , где  $U$  – потенциальная энергия пробного иона.

Для расчета отражателя строится и минимизируется безразмерный функционал

$$(\Delta t)^2 = \frac{1}{y_{\max} - y_{\min}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy (f - f_{cp})^2, \quad (5)$$

где  $f_{cp} = \frac{1}{y_{\max} - y_{\min}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy \cdot f$  и  $y_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_T}$ , а  $y_{\min} = \frac{U_{\min}}{U_T}$ .

Из формулы (5) видно, что значения функционала  $(\Delta t)^2$  зависят только от безразмерных параметров  $k$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ . Отсюда следует, что величина  $L_{dr}$  может быть выбрана независимо от параметров отражателя, и уже, зная  $L_{dr}$ , рассчитываются  $d_T$  и  $d_{otr}$ . При этом каждый рассчитанный отражатель оптимален для компенсации фиксированного энергетического разброса  $k$ . Кроме того, в отличие от отражателя [13, 14], не фиксируется значение тормозящего промежутка  $d_T$ . На  $d_T$  нет физических ограничений, и его можно выбрать произвольным, соответствующим параметру  $\lambda$ .

Расчеты показывают, что численное значение разрешающей способности по фактору компенсации энергетического разброса по крайней мере в 2 раза больше, чем у отражателя Мамырина. Это дает возможность выбрать меньшее значение  $L_{dr}$  для компенсации пространственного разброса ионов  $\Delta x$  в фокусе источника при заданной общей разрешающей способности прибора  $R$ . Следовательно, мы можем построить прибор с меньшими линейными размерами вдоль траектории движения ионов.

При расчете источника ионов мы исходили из того, что существует три типа источников с электронной пушкой: однозачорный [15], двухзачорный [16] и трехзачорный [17] источники. Очевидно, что оптимальной стратегией расчета источника является одновременное уменьшение пространственного разброса ионов в фокусе источника  $\Delta x$  и уменьшение энергетического разброса ионов  $\Delta U$ . Если рассуждать в параметрах отражателя  $k$ , то для однозачорного источника  $k \approx 1.5-1.8$ , для двухзачорного  $k \approx 1.2$ , для трехзачорного  $k \approx 1.03-1.05$ . Однако величина  $\Delta x$  минимальна для однозачорного источника, чуть больше для двухзачорного

и максимальна для трехзачного источника при одних и тех же параметрах электронной пушки. Проведенные численные расчеты позволили выбрать в качестве оптимального варианта двухзачный источник с  $k \cong 1.18$  и  $\Delta x \cong 0.7$  мм.

Для оптимизации детектора увеличено отношение  $V/l$ , где  $V$  – напряжение между выходной пластиной МКП и коллектором электронов, а  $l$  – расстояние между ними. Это позволяет уменьшить величину абберации  $\Delta T_{\Delta}$ , связанную со временем отклика МКП ( $\Delta t$ ) на приход одного иона. Измерения показывают, что  $\Delta t$  в разработанном приборе составляет не более 1 нс, в то время как во всех предыдущих приборах серии ЭМГ это время составляло  $\sim 5$  нс.

В результате расчетов по предложенной методике оптимизации был построен прибор ЭМГ-40-2.

### Конструкция прибора

Масс-анализатор прибора ЭМГ-40-2, изображенный на рис. 1, имеет следующие параметры и устройство. Длина камеры масс-анализатора (по фланцам) составляет 800 мм, а длина дрейфа ионов – 900 мм. Источник ионов смещен относительно фланца детектора на 265 мм. Все элементы электронной и ионной оптики, а также детектор смонтированы на трех фланцах. На левом (рис. 1) фланце установлен отражатель ионов на подвижном основании для окончательной юстировки прибора по спектру после сборки. На правом фланце установлен детектор на базе микроканальных пластин МКП-25. На верхнем фланце смонтированы электронная пушка и источник ионов. Конструкция масс-анализатора обеспечивает дифференциальную откачку источника ионов и остального объема масс-анализатора. Через нижний фланец масс-анализатор соединяется с вакуумным постом, обеспечивающим безмасляную высоковакуумную откачку.

В качестве форвакуумного насоса используется спиральный насос фирмы VARIAN ([www.varianinc.com](http://www.varianinc.com)) со скоростью откачки  $10 \text{ л с}^{-1}$ , остаточное давление 0.5 Па. Высокий вакуум создается турбомолекулярным насосом фирмы BOC EDWARDS ([www.bocedwards.com](http://www.bocedwards.com)) на магнитной подвеске со скоростью откачки  $250 \text{ л с}^{-1}$  и предельным давлением  $10^{-8}$  Па.

Газовая проба поступает в масс-анализатор через вентиль-накататель пережимного типа [18]. Капиллярный узел обеспечивает подачу газовых смесей при проведении градуировки масс-спектрометра в автоматическом режиме.

Сигнал с детектора усиливается широкополосным усилителем ORTEC 9306 ([www.ortec-online.com/electronics/preamp/9306.htm](http://www.ortec-online.com/electronics/preamp/9306.htm)) с полосой пропускания 1 ГГц. В масс-спектрометре ЭМГ-40-2 используется интегральная система регистрации, разработанная фирмой «МЕТТЕК» ([www.mettek.ru](http://www.mettek.ru)). Она может осуществлять измерение одновременно площади 12-ти пиков масс-спектра и последующую их оцифровку в течение периода развертки – 100 мкс. Выбранное время развертки обеспечивает анализ состава газовой смеси по всем основным компонентам и примесям с чувствительностью на уровне 1 ppm за 1 с.

### Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость разрешающей способности от массы ионов, полученная на масс-спектрометре – прототипе ЭМГ-20-2, на базе которого разрабатывался новый прибор. Измерения проводились на He, N<sub>2</sub>, Xe и гексафториде урана. Как видно из графика, в области легких масс разрешающая способность резко падает и в области массы 4 а.е.м. не превышает 120 на уровне 10 % от высоты массовой линии.

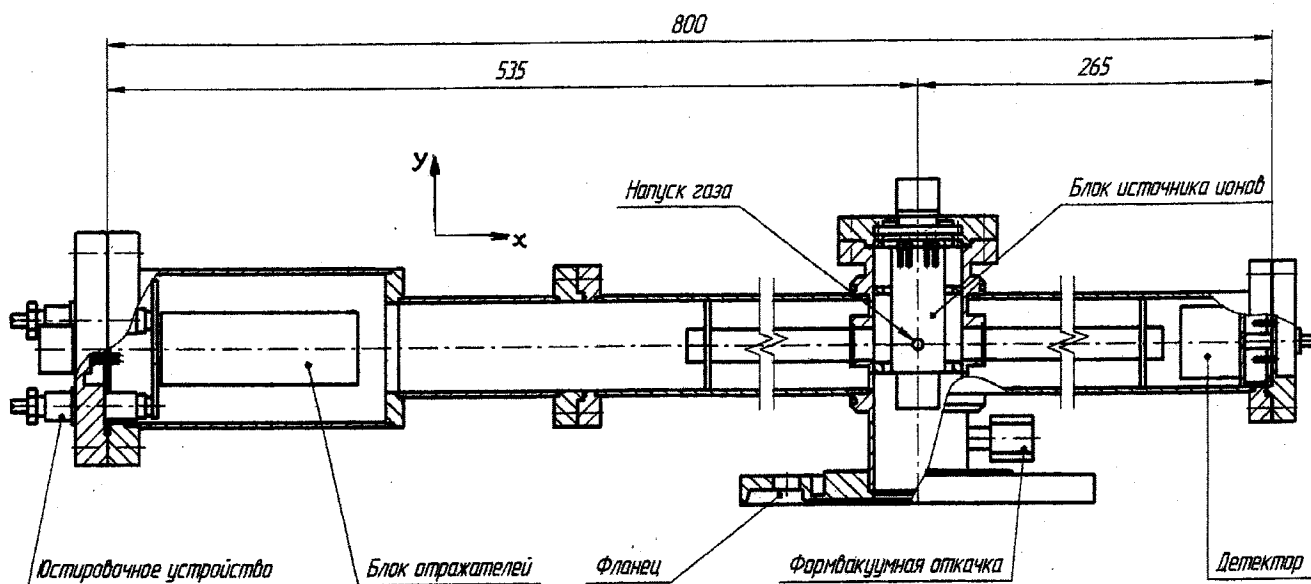


Рис. 1. Принципиальная схема камеры масс-анализатора масс-спектрометра ЭМГ-40-2.

На разработанном масс-спектрометре ЭМГ-40-2 получена разрешающая способность на ионах  ${}^4\text{He}^+ \sim \geq 500$ , т.е. в 4 раза выше, чем у прототипа, которая полностью согласуется с результатами расчетов по формуле (3).

На рис. 3 приведена осциллограмма масс-спектра газовой смеси  ${}^4\text{He}+\text{D}_2$ , в которой содержание  ${}^4\text{He}$  порядка 15 об. %. Шаг оцифровки спектра 1 нс, время прихода пика  $\text{D}_2^+$  на детектор составляет 10.4 мкс, ширина пика  $\text{D}_2^+$  на уровне 10 % от амплитуды  $\sim 9$  нс. Используя формулу для определения разрешающей способности (3), получаем для массы 4 а.е.м. разрешающую способность  $\sim 600$ .

Так как достигнутая разрешающая способность  $R_{10\%} \geq 500$  позволяет только надежно разрешить два неразделенных дублета ( ${}^3\text{He}^+ - {}^3\text{T}^+$ ) и ( $\text{HD}^+ - \text{H}_3^+$ ) на 3 а.е.м. и разделить  ${}^4\text{He}^+$  от неразрешенного триплета ( $\text{D}_2^+ - \text{H}_2\text{D}_2^+ - \text{HT}^+$ ) на 4 а.е.м., то дальнейшая работа по определению состава топливной газовой смеси связана с калибровкой прибора по эталонным смесям и разработкой алгоритма расчета состава газовой смеси в реальном масштабе времени. В работе [3] нами предложен набор калибровочных смесей.

Расчет и определение процентного состава анализируемой газовой смеси производится встроенным процессором с записью результатов измерений для обработки и хранения.

Используемая система регистрации масс-спектрометра предполагает, что состав основных компонентов газовой смеси известен заранее. Так обычно и бывает в технологических процессах, идущих с образованием газовой фазы, как, например, в процессе конвертерной выплавки стали или процессе сжижения воздуха, а также и в процессе контроля состава топливной смеси термоядерного реактора. Поэтому для достаточно точного количественного определения процентного состава газовой смеси можно измерять только отдельные, специально выбранные, линии масс-спектра.

Состав газовой смеси определяется путем решения системы линейных уравнений:

$$S_i = \sum_{j=1}^p A_{ij} X_j, \quad (6)$$

где  $S_i$  – сумма высот (или площадей) пиков от компонентов газовой смеси для  $i$ -той аналитической линии масс-спектра;  $A_{ij}$  – коэффициент относительной чувствительности для  $j$ -того компонента и  $i$ -той аналитической линии масс-спектра;  $X_j$  – искомая высота (или площадь)  $j$ -того компонента газовой смеси;  $p$  – суммарное число компонент газовой смеси.

Из уравнения (6) видно, что для решения задачи определения процентного состава газовой смеси необходимо знать, так называемую, градуировочную матрицу коэффициентов относительной чувствительности  $A_{ij}$ . Для большинства конкретных технологических задач большая часть коэффициентов  $A_{ij}$  равна нулю. Это следует из того,

что масс-спектры чистых веществ не вносят вклад в различные спектральные линии, и можно выбрать измеряемые масс-спектральные линии таким образом, чтобы число таких пересечений было бы минимальным. Например, масс-спектр  $\text{CO}$  состоит из основных компонент с массовыми линиями 12, 16, 28 а.е.м. Следовательно, если в газовой смеси присутствуют линии  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , то массовая линия  $\text{CO}$  внесет вклад в массовые линии  $\text{O}^+$  и  $\text{N}_2^+$ . Конечно при расчетах мы предполагаем, что разрешающая способность прибора не позволяет разрешить эти линии. Так как масс-спектры электронного удара большинства веществ известны, например, по базе данных NIST ([www.nist.gov/srd/](http://www.nist.gov/srd/)), легко построить таблицу перекрестных линий масс-спектра конкретной анализируемой газовой смеси. Далее нужно выбрать анализируемые линии масс-спектра из соображений минимального числа пересечений, что определит число коэффициентов отно-

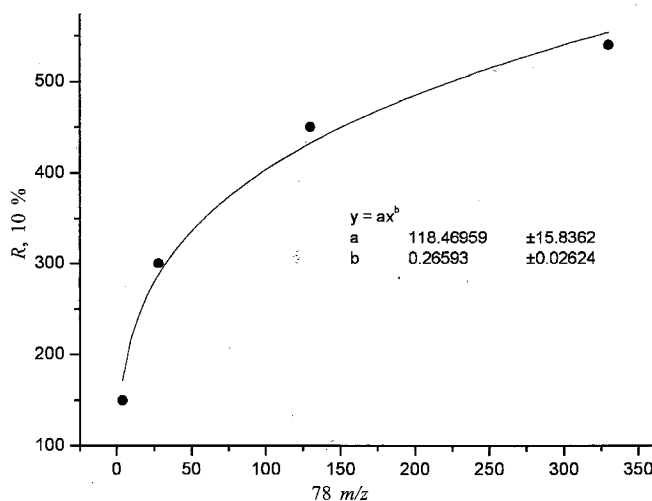


Рис. 2. Экспериментально полученная зависимость разрешающей способности от массы иона масс-спектрометра – прототипа ЭМГ-20-2

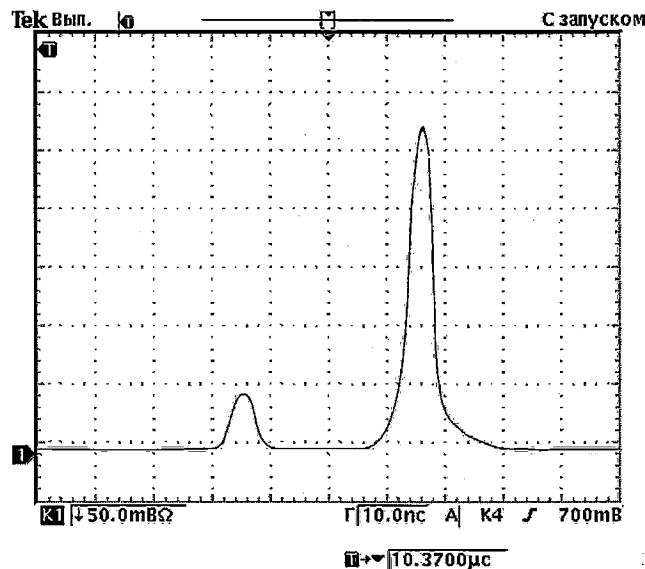


Рис. 3. Осциллограмма масс-спектра газовой смеси  ${}^4\text{He}+\text{D}_2$  с содержанием  ${}^4\text{He}$  порядка 15 об. %,  $\Delta M = 0.0256$  а.е.м.

сительной чувствительности  $A_{ij}$ , отличных от нуля. Для определения этих коэффициентов необходимо подобрать калибровочные смеси, которые позволят решить систему уравнений типа (6) относительно неизвестных  $A_{ij}$ , по известным компонентам из состава калибровочных смесей  $X_j$  и измеренных по спектру  $S_j$ . Подбор состава калибровочных смесей неоднозначен, и для решения одной и той же задачи можно выбрать разные калибровочные смеси. Пример расчета и определения состава газовой смеси для процесса конвертерного производства стали приведен в [19].

Нормировка коэффициентов относительной чувствительности для анализируемых компонентов и использование объемных концентраций, выраженных в процентах, для определения состава газовой смеси вместо парциальных давлений компонентов приводит к повышению точности газового анализа в технологических процессах. Это позволяет устранить негативные влияния нестабильностей скорости потока, давления и температуры газовой пробы, подаваемой на вход масс-спектрометра, на результаты анализа.

## Заключение

Разработанный в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН и изготовленный фирмой «МЕТТЕК» времяпролетный масс-спектрометр ЭМГ-40-2 в значительной степени решает задачу точного непрерывного химического и изотопного анализа водородно-гелиевых тритийсодержащих газовых смесей. Режим измерения, градуировки и ввода газовой пробы полностью автоматизированы. Прибор имеет промышленное исполнение, небольшие габариты и массу.

В настоящее время фирмой «МЕТТЕК» изготовлено три опытно-промышленных образца приборов и проведены их успешные пуско-наладочные испытания. Эксплуатационные испытания прибора на газовых смесях, содержащих тритий, предполагается провести в Федеральном ядерном центре (г. Саров).

Авторы благодарны Г.Л. Саксаганскому за привлечение внимания к проблеме и постоянный интерес к этой работе, И.А. Абрамову и П.В. Шернину за финансовую поддержку.

## Список литературы

- ITER-JCT and Home Teams (presented by G. Janeschitz) "STATUS OF ITER", *Plasma Phys. Control. Fusion* **37**, A19-A35 (1995).
- С.А. Алексеенко, Н.Н. Аруев, Б.А. Мамырин, Н.А. Огурцова, Н.Н. Рязанцева, «Масс-спектрометрический анализ изотопов водорода и гелия», *Атомная энергия* **51**, 27-31 (1981).
- Н.Н. Аруев, И.И. Пилюгин, А.В. Козловский, Г.Л. Саксаганский, «Требования к разрешающей способности и калибровка времяпролетного масс-спектрометра для on-line анализа топливных газовых смесей ТЯР», *Атомная энергия* **104**, № 4, 233-237 (2008).
- Б.А. Мамырин, С.А. Алексеенко, Н.Н. Аруев, «Магнитный резонансный масс-спектрометр с разрешающей способностью 350000», *ЖЭТФ* **80**, 2125-2131 (1981).
- Н.Н. Аруев, Е.Л. Байдаков, Б.А. Мамырин, «Детектор ионных пучков», *ЖТФ* **57**, 300-305 (1987).
- Б.А. Мамырин, Д.В. Шмикк, «Линейный масс-рефлектор», *ЖЭТФ* **76**, 1500-1505 (1979).
- Н.Н. Аруев, А.В. Козловский, И.Л. Федичкин, Г.Л. Саксаганский, «О возможности анализа дейтерий-третиевых газовых смесей с помощью времяпролетного масс-спектрометра», *Письма в ЖТФ* **23**, 83-87 (1997).
- T. Bergmann, T.P. Martin, H. Schaber, "High-resolution time-of-flight mass spectrometer", *Rev. Sci. Instrum.* **60** (4), 792-793 (1989).
- A.N. Verentchikov, M.I. Yavor, Y.I. Hasin, M.A. Gavrik, "Multi-reflecting TOF analyzer for high resolution MS and parallel MS-MS", *Масс-спектрометрия* **2**, 11-22 (2005).
- Б.А. Мамырин, «Исследования в области разделения ионов по времени пролета», Дис. докт. физ.-мат. наук. ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Ленинград, 1966.
- M. Guilhaus, "Principles and instrumentation in time-of-flight mass-spectrometry", *J. Mass Spectrom.* **30**, 1519-1532 (1995).
- И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*, Наука, Москва, 1986.
- Б.А. Мамырин. «Времяпролетный масс-спектрометр», А. с. 198034 СССР: *Бюл. изобрет.* **13**, 148 (1967).
- В.И. Каратаев, Б.А. Мамырин, Д.В. Шмикк, «Новый принцип фокусировки ионных пакетов во времяпролетном масс-спектрометре», *ЖТФ* **41**, 1498-1501 (1971).
- Е.И. Агишев, Н.И. Ионов, «Импульсный масс-спектроскоп», *ЖТФ*, **26**, 203-208 (1956).
- M.H. Studier, "Continuous ion source for time-of-flight mass spectrometer", *Rev. Sci. Instrum.* **34**, 1367-1370 (1963).
- Patent # 5955730, USA, E.L. Kerley, R.E. Haufler, "Reflection Time-of-flight mass spectrometer", <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.
- Б.А. Мамырин. «Высоковакуумный вентиль-натекатель», *ИТЭ*, **33**, 205-207 (1990).
- С.Н. Марковский, А.В. Козловский, И.Л. Федичкин, Е.Л. Гуревич, О.Ю. Бегак, А.В. Бородин, «Контроль технологических процессов в металлургическом производстве с использованием масс-спектрометрического газоанализатора «ЭМГ-20», *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* **66**, 8-13 (2000).