

УДК 543.51

## **МИ-40 ТРИТИУМ – новый прибор для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей. Перспективы отечественной масс-спектрометрии для изотопного анализа легких газов**

**А. А. Семенов, А. В. Лизунов, А. С. Аникин, А. Н. Букин,  
И. Г. Лесина, А. С. Бердников<sup>1</sup>, В. Д. Саченко<sup>1</sup>,  
С. В. Масюкевич<sup>1</sup>, А. А. Дьяченко<sup>1</sup>, Л. Н. Галль<sup>1</sup>,  
Л. М. Назаренко<sup>2</sup>, Е. М. Якушев<sup>2</sup>, О. А. Беляева<sup>3</sup>,  
И. А. Громов<sup>4</sup>, А. С. Антонов<sup>4</sup>, Н. С. Самсонова<sup>4</sup>, Н. Р. Галль<sup>4</sup>**

АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», г. Москва, Россия,  
AIASemenov@bochvar.ru

<sup>1</sup>Институт аналитического приборостроения РАН, г. С-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>ООО МС-Био, г. С-Петербург, Россия, ms-bio2011@yandex.ru

<sup>4</sup>Физико-Технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. С-Петербург, Россия,  
gall@ms.ioffe.ru

*В статье говорится о разработке нового масс-спектрометра МИ-40 ТРИТИУМ, обеспечивающего разрешение мультиплетов водорода на 2–9 массовых числах с разрешающей способностью порядка 3500 при относительной интенсивности соседних ионов  $10^{-3}$ , но не разделяющего изотопно-замещенные углеводороды, что позволило сделать прибор более компактным, дешевым и надежным. Ряд технических предложений, позволил создать оптимальный специализированный прибор с комбинацией источника ионов с электронной ионизацией и призматического масс-анализатора с двойной фокусировкой.*

Тяжелые изотопы водорода дейтерий и тритий являются компонентами термоядерного горючего, которое может иметь как мирное, так и военное использование. В связи с этим их относят к специальным неядерным материалам (СНЯМ), производство и оборот этих изотопов строго контролируется и регулируется [1]. Задача изотопного анализа водородно-гелиевых смесей имеет стратегическое значение для обороноспособности государства, поскольку связана с учетом и контролем СНЯМ на предприятиях, связанных с производством и использованием дейтерия и трития. Кроме того, изотопный анализ водородно-гелиевых смесей требуется для аналитического обеспечения разработок в области управляемого термоядерного синтеза, в частности, при создании и эксплуатации международного термоядерного реактора ИТЭР. Обеспечение анализа таких смесей само по себе представляет сложнейшую техническую задачу. Это связано в первую очередь с множественным наложением сигналов от различных ионных форм, в которых могут находиться изотопы водорода и гелия во время их анализа. К тому же при анализе требуется обеспечить работу в большом диапазоне изотопных концентраций, имея одновременно высокие значения разрешающей способности и чувствительности. Ситуацию значительно усложняет то, что тритий сильно радиоактивен и опасен при попадании в человеческий организм [2]. В современной аналитической масс-спектрометрии изотопный анализ легких газов занимает значимое место. При этом масс-спектрометры для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей на мировом рынке отсутствуют в связи со спецификой их использования.

В отечественном приборостроении можно выделить несколько этапов развития изотопного анализа легких газов. Началом работ в нашей стране по этой тематике следует считать Атомный проект СССР. С началом Атомного проекта в СССР возникла необходимость обеспечения изотопного анализа как ядерных (урана, плутония), так и специальных неядерных материалов, в первую очередь – изотопов водорода, необходимых компонентов термоядерных боеприпасов. Первым советским серийным масс-спектрометром для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей стал МВ2301. Его разработка была начата в 1949 году. Конструктором МВ2301 выступил Р. Н. Галль из ленинградского СКБ аналитического приборостроения Академии Наук (рис. 1). В требованиях к прибору были заложена высокая разрешающая способность (5000 на 50 % высоты пиков) с возможностью измерений в диапазоне масс от 1 до 200 а.е.м. Для обеспечения этого впервые в мире был разработан масс-анализатор с неоднородным по радиусу магнитным полем. Этот прибор был модернизирован, в результате чего в 1956 г. появился масс-спектрометр для изотопного анализа легких газов МВ2302, разработанный для Научного центра атомной промышленности (ныне – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Первый образец МВ2302 был установлен и испытан в НИИ-9 (АО «ВНИИНМ»). Он стал первым в мире чисто магнитным спектрометром высокого разрешения.



Рис. 1. Р. Н. Галль (в центре) демонстрирует академикам Котельникову и Прохорову новый изотопный масс-спектрометр

В продолжение работ по анализу водородно-гелиевых смесей на рубеже 70–80-х годов прошлого века конструкторами масс-спектрометрического отдела СКБ АП, возглавляемого Р. Н. Галлем, по техническому заданию специалистов тритиевого отдела ВНИИНМ им. академика А. А. Бочвара был разработан МИЗ305 – новый масс-спектрометр с двойной фокусировкой для анализа водородно-гелиевых смесей, высоко специализированный прибор, обладавший уникальными характеристиками, длительное время остававшийся непревзойденными в мире (рис. 2). И на этот раз первый из приборов МИЗ305 был также установлен во ВНИИНМ, где с его помощью специалисты тритиевого отдела десятки лет решали различные производственные и научные задачи, разрабатывая для этого новые аналитические методики.



Рис. 2. Масс-спектрометр МИЗ305 с системой подготовки проб для определения изотопного состава водорода в тритийсодержащих продуктах (АО «ВНИИНМ»)

Тем не менее, со временем и МИЗ305 устарел как морально, так и физически, в связи с чем возникла потребность в разработке нового современного масс-спектрометра для изотопного анализа легких газов, удовлетворяющего всем необходимым требованиям. В середине 2000-х годов рабочая группа, состоящая из представителей многих отраслевых и внеотраслевых организаций, под руководством А. С. Штаня (НИИТФА) составила техническое задание на создание такого прибора. Разработку предполагалось проводить в масс-спектрометрической лаборатории ИАП РАН под научным руководством Л. Н. Галль. Но из-за дефицита финансирования эти работы не дошли до стадии разработки, а затем в результате реформирования Росатома прекратил свое функционирование и координационный научно-технический совет по масс-спектрометрии, благодаря которому в период с 1998 по 2005 годы был разработан и выпущен в серию целый ряд уникальных отечественных масс-спектрометров для нужд Атомной отрасли. Обсуждение вопроса создания новых специализированных отечественных масс-спектрометров в Росатоме на время прекратилось [3].

Новый этап развития отечественной масс-спектрометрии начался в 2014–2015 годах, после того, как по инициативе специалистов АО «ТВЭЛ» и АО «ВНИИНМ» прошел ряд совещаний, на которых вновь была рассмотрена проблема новых разработок отечественных масс-спектрометров. Был сформирован новый работоспособный научный коллектив, подготовивший ряд совместных публикаций в научных журналах и докладов на конференциях, в которых были сформированы технические предложения по модернизации и разработке новых масс-спектрометров [4–6]. При этом задача создания прибора для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей, несмотря на ее актуальность, долгое время уходила на задний план из-за очевидной на то время сложности и дороговизне ее решения. Однако многолетние поиски научного решения привели к успеху. Свежий взгляд на старую проблему создания прибора для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей позволил предложить новое решение задачи изотопного анализа легких газов, основанное на ранее не использованных возможностях магнитной статической масс-спектрометрии. Было подготовлено совместное техническое решение, которое подвело итог многолетней работы [6]. На его основе в настоящее время разработан и изготовлен новый специализированный масс-спектрометр МИ-40 ТРИТИУМ для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей, значительно более дешевый и простой, чем все предшествующие ему аналоги, но вместе с тем обеспечивающий требуемые аналитические характеристики (рис. 3). Более подробно об этом будет сказано ниже.



Рис. 3. Масс-спектрометр МИ-40 ТРИТИУМ с группой разработчиков и представителей заинтересованных организаций в АО «ВНИИНМ» (2019). В центре сидит – Л. Н. Галль, автор концепции магнитно-призменного масс-спектрометра для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей

Сложность задачи масс-спектрометрического изотопного анализа водородно-гелиевых смесей заключается в следующем. В диапазоне масс 2–6 а.е.м. молекулярный состав водорода представлен шестью различными молекулами:  $H_2$ ,  $HD$ ,  $D_2$ ,  $HT$ ,  $DT$  и  $T_2$ . Последние три изотомера сильно радиоактивны из-за радиоактивности трития, входящего в их состав ( $T_{1/2} = 12,3$  года). При электронной ионизации молекулы не только ионизируются, но и диссоциируют, а их ионная смесь пополняется ионами-продуктами диссоциации молекул:  $H^+$ ,  $D^+$ ,  $T^+$ , а, кроме того, ионами-продуктами ион-молекулярных реакций вида  $H_3^+$ ,  $H_2D^+$ ,  $HDT^+$ . Гелий же, как известно, существует только в атомарном виде и в природе представлен двумя стабильными изотопами  $^3He$  и  $^4He$ , ионы которых также пополняют анализируемый ионный состав. В результате усложнения состава ионного пучка на всех массовых числах в диапазоне 2–9 а.е.м. образуются мультиплетные группы ионов (табл. 1), без разделения которых невозможно получить достоверные количественные данные о составе анализируемой газовой смеси.

Для разделения всех мультиплетных групп кроме неразрешимого дублета  $^3He^+ - T^+$ , как это следует из табл. 1, требуется разрешающая способность по основанию не менее чем 3500. Она в тысячи раз превышает массу самих анализируемых молекул, что и создает парадоксальную ситуацию при выборе масс-анализатора: массы ионов очень малы, а требуемая разрешающая способность значительна. Недостаток же разрешающей способности приводит к низкой достоверности результатов, а присутствие в больших количествах радиоактивного трития делает невозможным использование электронного умножителя в системах детектирования ионных пучков. Расчетные приемы и поправки на диссоциацию и ассоциацию помогают немного уточнить результаты анализа, однако доля ионов-продуктов ион-молекулярных реакций

нестабильна и зависит от настройки ионного источника. Существенно усложняют задачу количественного анализа еще два требования, относящиеся к динамическому диапазону измерений (до  $10^5$ ) и к точности определения изотопных отношений (не хуже чем 0,1%). Ионно-оптическую схему масс-анализатора дополнительно усложняет также и необходимость иметь в анализе сопровождающие данные о присутствии в технологической смеси посторонних примесей: атмосферных газов и тритий-замещенных углеводородов, что увеличивает измеряемый диапазон масс. Полный набор параметров, необходимый и достаточный для достоверного контроля водородно-гелиевых смесей в технологиях их получения, приведен в табл. 2.

Таблица 1

Массовые числа, анализируемые ионы и требуемая разрешающая способность масс-спектрометров в диапазоне масс 1–9 (по основанию пика)

M, а.е.м.	Ионы	Разрешающая способность	M, а.е.м.	Ионы	Разрешающая способность
1	$H^+$	–	5	$DT^+ - H_2T^+$	3250
2	$D^+ - H_2^+$	1320		$H_2T^+ - D_2H^+$	1160
3	$^3He^+ - T^+$	150600*	6	$T_2^+ - HDT^+$	1030
	$T^+ - HD^+$	510		$HDT^+ - D_3^+$	1400
	$HD^+ - H_3^+$	1950	7	$N_2^+ - T_2H^+$	180
4	$^4He^+ - HT^+$	190		$T_2H_2^+ - D_2T^+$	1630
	$HT^+ - D_2^+$	930	8	$O^{2+} - D_2T^+$	170
	$D_2^+ - H_2D^+$	2600	9	$T_3^+ - (H_2O)^{2+}$	210

\* – дублет масс-спектрометрически разделять не целесообразно.

Таблица 2

Параметры масс-спектрометра для достоверного контроля водородно-гелиевых смесей

	Параметр масс-спектрометра	Величина
1	Разрешающая способность на уровне 10 % высоты пика	3500
2	Изотопическая чувствительность, не менее	$1 \cdot 10^{-5}$
3	Диапазон масс, а.е.м.	1–40
4	Точность измерений изотопных отношений, %	0,1

При анализе всех реализованных в мире вариантов конструкции масс-спектрометров для изотопного анализа легких газов было выявлено три различных подхода к используемому оборудованию для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей.

Так и не реализованный первый вариант решения этой задачи состоит в разработке прибора, ориентированного на разделение не только мультиплетов собственно водородно-гелиевой смеси (кроме дублета  $^3He^+ - T^+$ , масс-спектрометрически не разделяемого), но и изотопически замещенных форм

метана (массовые числа 19–30 а.е.м.), для чего необходима разрешающая способность  $R_{10\%} \sim 30000$ . Такой подход на первый взгляд кажется идеальным решением. Он может быть реализован изготовлением статического масс-спектрометра с двойной фокусировкой и с существенно увеличенными габаритами. На самом деле этот вариант чрезмерно сложен в изготовлении и эксплуатации, поэтому есть основания считать, что задача анализа изотопически замещенных форм метана все равно не будет решена из-за дополнительных технических трудностей

Второй вариант не позволяет разделить мультиплеты изотопно-замещенных форм метана, но предполагает измерение факта присутствия примесей и их идентификацию, что существенно упрощает и удешевляет технологию прибора. Для получения разрешающей способности порядка 3500 в этом случае вполне достаточно обычного масс-анализатора с двойной фокусировкой, а область примесей легко перекрывается изменением магнитного поля (магнитной разверткой). Именно этот подход был реализован при разработке масс-спектрометра МИ-3305 «Тритон», но прибор этого типа все равно остается крайне дорогим и сложным.

В качестве третьего следует назвать распространенный, к сожалению, вариант использования различных приборов, изначально не предназначенных для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей, но вынуждено адаптированных для решения этой задачи в условиях отсутствия специализированного масс-спектрометра. Например, для этой задачи могут быть использованы такие однокаскадные магнитные секторные масс-спектрометры как отечественные МИ1201 или импортные МАТ 271/45, которые хуже всего анализируют именно легкие массы. Мультиплеты на 3–7 массовых числах в этом случае не могут быть разрешены, а зависимость аналитических параметров от настройки источника приводят к еще большему снижению и точности анализа, и его достоверности. Этот подход, так же как и применение квадрупольных или времяпролетных масс-спектрометров, является вынужденным и связан с отсутствием требуемого масс-спектрометрического оборудования. Имея разрешающую способность на легких массах не более 500, но будучи все равно дорогими в исполнении и обслуживании, они, к сожалению, далеко не в полной мере решают задачу изотопного анализа водородно-гелиевых смесей.

Итак, несмотря на несомненные успехи в теории и практике мирового масс-спектрометрического приборостроения, предлагаемые сегодня к разработке изотопные приборы основаны на ионно-оптических концепциях 50-летней давности, что определяет ограничения в их аналитических и эксплуатационных характеристиках. Недостатки этих концепций, в свою очередь, обусловлены свойствами секторных однородных магнитных полей, у которых увеличение дисперсии ионов по массе достигается только одним способом: увеличением радиуса поворота ионов в поле, что ведет к увеличению габаритов и массы всего прибора.

В этой противоречивой ситуации удалось найти решение, которое кардинально отличается от всех предыдущих вариантов. Была разработана отечественная схема, не имеющая мировых аналогов и позволяющая изготовить прибор одновременно несложный в конструктивном исполнении, относительно

недорогой и обеспечивающий необходимое разрешение. Решение заключается в использовании двумерной магнитной призмы, необычного секторного магнитного элемента, разработанного и всесторонне изученного в 1950-е годы советским электрооптиком В. М. Кельманом. В 2016 году специалистами Института аналитического приборостроения РАН под научным руководством д.ф.-м.н., профессора Л. Н. Галль на основе магнитной призмы была разработана концепция исполнения прибора для изотопного анализа газовых смесей с массами до 9 а.е.м., удовлетворяющая всем условиям из табл. 2.

Двумерная магнитная призма представляет собой магнит с полюсными наконечниками, расположенными симметрично относительно средней плоскости (горизонтальная плоскость отклонения) и с границами, параллельными друг другу в месте входа и выхода пучка и вытянутыми в этом направлении. По своим свойствам такой элемент является полным аналогом оптической призмы, обладая только угловой дисперсией, т. е. отклоняя входящий в нее параллельный ионный пучок на различные, в зависимости от массы, углы, но не фокусируя отклоненные пучки. Для использования в качестве масс-анализатора такая магнитная призма должна быть дополнена электростатическими элементами, например, линзами, расположенными с двух сторон от магнитной призмы. При этом линза, расположенная со стороны источника ионов, превращает ионный пучок, входящий в призму, в параллельный, а линза, расположенная после призмы, фокусирует разделенные ионные пучки на требуемом расстоянии от призмы, обеспечивая для них линейную дисперсию. Работоспособность призмной оптики была экспериментально проверена в 80-х годах прошлого века при создании уникального призмного масс-спектрометра с двойной фокусировкой, позволявшего получать разрешающую способность  $R_{10\%}$  вплоть до 200000 [6]. Главным свойством магнитной призмы в этом случае является независимость ее угловой дисперсии от радиуса поворота ионов. От него зависит только величина отклоняющего магнитного поля и для ионов малых масс (табл. 2) это поле невелико. Требуемая же для получения высокой разрешающей способности дисперсия задается длиной фокусного расстояния выходной линзы.

Российской компанией ООО «МС-Био» в кооперации с рядом организаций и по техническому заданию, составленному специалистами ВНИИИМ, в период с 2017 по 2018 гг. разработан и выпущен специализированный масс-спектрометр МИ-40 ТРИТИУМ для решения поставленной задачи. В МИ-40 ТРИТИУМ радиус отклонения ионов 92,5 мм; при ускоряющем напряжении 5 кВ для ионов с массовым числом 9 а.е.м. (ион  $T_3^+$ ) это поле составляет примерно 3000 э; линейная дисперсия составляет 345 мм на 100%  $\Delta m/m$ .

Новый прибор основан на группе инновационных ионно-оптических и конструкционных решений, которые позволили сделать его существенно более компактным, легким (250 кг против традиционных 1–1,5 тонн), относительно дешевым в производстве, при высоком разрешении и точности измерений. К инновационным решениям относятся:

1. Призмный масс-анализатор высокого разрешения с дополнительным каналом.
2. Технология «МС-платформа».

3. Настроечные линзы «Tuning Optics».
4. Высокоэффективный источник ионов с двойной экстракцией.
5. Система ввода пробы с натекателем Мамырина.
6. Построение прибора с полугерметичной внутренней защитной зоной.

В масс-спектрометре использован призмный статический масс-анализатор, выполненный по схеме Е-Н-Е, с разрешающей способностью порядка 3500 в основном канале (рис. 4). Это позволяет разделить все мультиплеты кроме  $T^+ - ^3He^+$ , для разрешения которого использовано управляемое поглощение водорода в системе напуска.

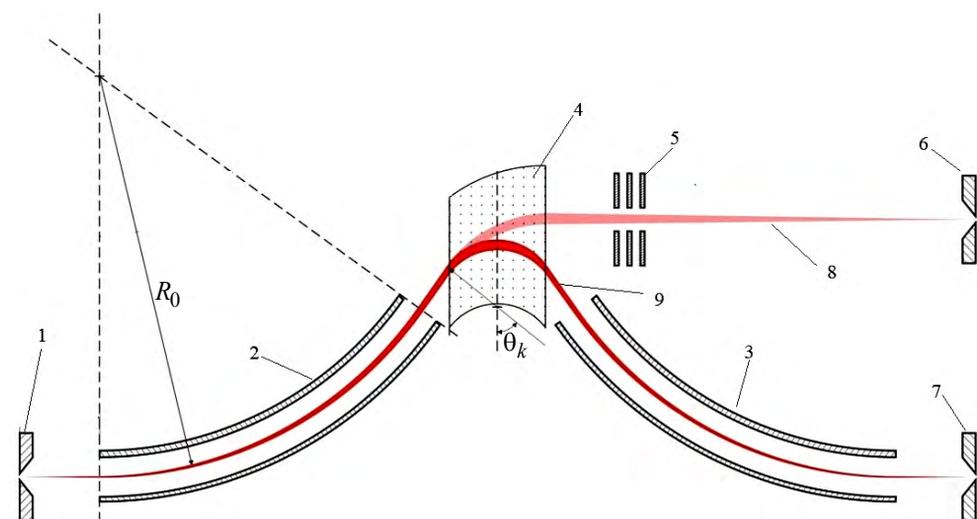


Рис. 4. Ионно-оптическая схема водородно-гелиевого изотопного масс-спектрометра с призмным масс-анализатором МИ-40 ТРИТИУМ: 1 – щель источник ионов; 2, 3 – энергoанализатор; 4 – призмный диспергирующий магнит; 5 – фокусирующая линза дополнительного канала; 6 – щель дополнительного приемника ионов; 7 – щель сновного приемника ионов; 8 – траектория движения ионов дополнительного канала; 9 – траектория движения ионов основного канала;  $R_0$  – радиус энергoанализатора;  $\theta_k$  – половинный угол отклонения ионов

Для ускорения измерений используется прецизионное управление магнитным полем с помощью ЯМР-датчика, позволяющее обеспечивать «прыжок» в нужную часть спектра с высокой точностью. Датчик расположен в высоком вакууме непосредственно в зазоре полюсных наконечников диспергирующего магнита. Точность определения величины магнитного поля в области его однородности – порядка  $10^{-4}$  относительных единиц. Дополнительный канал в масс-анализаторе (рис. 4) обеспечивает измерение следов атмосферных газов, которые могут присутствовать в смеси, осуществляя его одновременно с работой основного канала. Предел детектирования канала находится на уровне  $10^{-4}$  от основных пиков пробы. Разрешающая способность в дополнительном канале не превышает 60 для того, чтобы обеспечить макси-

мальную чувствительность дополнительного канала по отношению к атмосферным газам.

Система ввода пробы обеспечивает возможность подключения пробозаборных баллонов с пробой и стандартом и их быстрой смены, а также подключения к технологической магистрали. Очистка системы ввода пробы производится автоматически по специальному алгоритму, включающему в себя чередующиеся три цикла откачки и два цикла продувки сухим азотом. После очистки доля предыдущей пробы не превышает  $10^{-4}$ . Время очистки системы ввода пробы не превышает 3 минут, полное время измерения с накоплением сигнала составляет  $\sim 10$  мин.

Источник ионов с двойной экстракцией за счет поднятой под потенциал передней крышки камеры ионизации и за счет экстрагирующего электрода обеспечивает высокую яркость и низкую расходимость пучка ионов, но при более высоком, чем обычно, энергетическом разбросе. Он хорошо согласуется со схемами с двойной фокусировкой

Линзы системы Tuning Optics, входящие в состав ионно-оптической схемы, представляют собой линзы горизонтальной фокусировки со значительным фокусным расстоянием, предназначенные для точной подстройки эффективных длин входного и выходного плеч масс-спектрометра. Эти линзы позволяют снизить требование к точности изготовления и установки элементов ионно-оптической схемы за счет возможности электрической юстировки прибора.

Прибор построен по технологии «МС-платформы»: все значимые ионно-оптические элементы, в том числе полюсные наконечники диспергирующего магнита, устанавливаются в высоком вакууме на единой платформе, обеспечивающей их точную юстировку. Вертикальное расположение платформы устраняет риск ее деформации под собственным весом и вместе с тем позволяет дополнительно уменьшить площадь, занимаемую прибором в рабочем помещении. Магнитопровод и магнитодвижущие катушки располагаются в области атмосферного давления и сообщаются с полюсными наконечниками через магнитопрозрачные стенки камеры.

Платформа установлена в единой вакуумной камере, которая откачивается одновременно турбомолекулярным и магниторазрядным насосами для уменьшения дискриминаций при откачке. Вакуум в камере в режиме измерений  $\sim 10^{-6}$  Торр.

Прибор построен по зональной схеме с обеспечением внутренней защитной зоны. Он закрыт квазигерметичным кожухом, в верхней части которого расположен вентилятор, непрерывно отводящий газ из-под кожуха в спецвентиляцию. Газовые потоки внутри кожуха рассчитаны так, чтобы газ, выделяющийся при смене пробозаборного баллона, уносился в вентиляцию.

Так как дублет  ${}^3\text{He}^+ - \text{T}^+$  не может быть разрешен масс-спектрометрически, для измерения доли трития на фоне присутствия  ${}^3\text{He}$  в состав масс-спектрометра введен узел удаления водорода из пробы. Принцип его работы заключается в диффузии водорода через нагретую палладиевую мембрану. В настоящий момент эффективность данного устройства неизвестна и подлежит экспериментальному определению.

Масс-спектрометр оснащен всей необходимой электроникой, позволяющей настраивать прибор с управляющего персонального компьютера и проводить измерения в автоматическом режиме. Управляющая программа позволяет осуществлять сканирование спектра по специальному алгоритму, минимизирующему время измерения, индицировать текущее состояние, настраивать диапазон сканирования в пользовательском режиме, рассчитывать нуклидный состав пробы и её изотопный состав по отношению к эталону.

Завершение отладки масс-спектрометра МИ-40 ТРИТИУМ и размещение прибора на тритиевом участке АО «ВНИИНМ» ожидается к концу 2019 года. На дальнейшую перспективу намечены разработка и метрологическая аттестация методик анализа изотопных смесей водорода, как содержащих, так и не содержащих тритий, внесение прибора в реестр измерительных средств, а также изготовление и поставка серии приборов в обеспечение заинтересованных предприятий ГК «Росатом».

Таким образом:

– Разработан, изготовлен и в настоящее время проходит настройку специализированный масс-спектрометр МИ-40 ТРИТИУМ с двойной фокусировкой и призмным масс-анализатором для изотопного анализа водородно-гелиевых смесей.

– Прибор создан на основе опережающих инновационных технологий, позволивших сделать его легким, компактным без потери точности и чувствительности измерений.

– Прибор ориентирован на решение задач учета и контроля СНЯМ, а также на технологические задачи предприятий, работающих с тяжелыми изотопами водорода, таких как ФГУП «ЛО «Маяк», РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова и АО «ВНИИНМ», ПИЯФ им. Б. П. Константинова и др.

Авторы выражают благодарность всем тем, кто поддержал инициативу создания нового прибора, своим соавторам и коллегам, оказавшим помощь в работе, в том числе Т. Э. Кулешовой (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН) и Prof. H. Wollnik (California Univ., USA).

## Список литературы

1. НП-030-12. Основные правила учета и контроля ядерных материалов.
2. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. М.: Энергоатомиздат. 1985, 248 с.
3. Семенов А. А. История и перспективы создания отечественных масс-спектрометров для изотопного анализа легких газов // Вопросы атомной науки и техники. Серия материаловедение и новые материалы. 2017, вып. 3 (90), с. 74–87.
4. Баженов А. Н., Фомина Н. С., Галль Н. Р., Галль Л. Н., Семенов А. А., Кудрявцев В. Н., Лизунов А. В., Лесина И. Г. Аналитические возможности детектирования следовых количеств бериллия с помощью масс-спектрометрии ЭРИАД // Атомная энергия. 2015, т. 118, № 1, с. 34–37.

5. Галль Л. Н., Кузьмин А. Г., Манойлов В. В., Саченко В. Д., Сведенцов В. Л., Хасин Ю. И., Галль Н. Р., Рязанцева Н. Н., Милешкин Ю. А., Семенов А. А., Кудрявцев В. Н., Лесина И. Г., Иванов Б. В., Лизунов А. В. Пути трансформации ионно-оптической системы статического масс-спектрометра МСД-650 для повышения достоверности и точности результатов изотопного анализа водородно-гелиевых смесей // Вестник Актюбинского регионального государственного университета. 2016, № 2, с. 49–51.

6. Галль Л. Н., Семенов А. А., Кудрявцев В. Н., Лизунов А. В., Лесина И. Г., Иванов Б. В., Букин А. Н., Штань А. С., Кирьянов Г. Е., Антонов А., Галль Н. Р. Новые решения в масс-спектрометрическом изотопном анализе водородно-гелиевых смесей. Условие получения достоверных данных // Научное приборостроение. 2016, т. 26, № 3, с. 24–34.

## **MI-40 TRITIUM: a new instrument for hydrogen-helium mixture isotopic analysis. Progress in russian mass-spectrometry for isotopic analysis of light gases**

A. A. Semenov, A. V. Lisunov, A. S. Anikin, A. N. Bukin,  
I. G. Lesina, A. S. Berdnikov<sup>1</sup>, V. D. Sachenko<sup>1</sup>,  
S. V. Masukevich<sup>1</sup>, A. A. Diachenko<sup>1</sup>, L. N. Gall<sup>1</sup>,  
L. M. Nazarenko<sup>2</sup>, E. M. Yakushev<sup>2</sup>, O. A. Beliaeva<sup>3</sup>,  
I. A. Gromov<sup>4</sup>, A. S. Antonov<sup>4</sup>, N. S. Samsonova<sup>4</sup>, N. R. Gall<sup>4</sup>

Bochvar Institute, Moscow, Russia, AIAsemenov@bochvar.ru

<sup>1</sup>Institute for Analytical Instrumentation of RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Nuclear Physics institute, Almaty, Kasahstan

<sup>3</sup>MS-bio Ltd, St. Petersburg, Russia, ms-bio2011@yandex.ru

<sup>4</sup>Ioffe Institute of RAS, St. Petersburg, Russia, gall@ms.ioffe.ru

*The paper concerns the new domestic mass-spectrometry MI-40 TRITIUM development. The instrument can resolve multiplets at 2–9th mass units having resolution of about 3500 at neighbor ion current ratio of  $10^{-3}$ ; however it should not resolve isotopically substituted hydrocarbons, to make the mass-spectrometer cheaper, more compact and robust. A number of technical ideas have been put forward to optimize a specialized instrument based on a combination of electron ionization ion source and prism double focusing mass-analyzer.*