



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. В.Л. ТАЛЬРОЗЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИНЭПХФ РАН ИМ. В.Л. ТАЛЬРОЗЕ)

РФ, 119334, г. Москва,  
Ленинский проспект, 38, корп.2  
ИНН7736035245/КПП773601001  
ОГРН 1037739330023  
ОКПО 04843385

Тел./факс +7(499)1378258

10.06.2015. №11413-8428-118

На № \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Института энергетических проблем  
химической физики им. В.Л. Тальрозе  
Российской академии наук,  
д.ф.-м.н., профессор



**В.Н. ЕМОХОНОВ**

« 10 » 06 2015 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Российской академии наук на диссертацию КУЗЬМИНА Дениса Николаевича, выполненную на тему «Масс-спектрометр с постоянным магнитом для контроля химического состава технологических газов в АСУТП сублиматного производства гексафторида урана», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

## **Актуальность темы диссертации**

Сублиматное производство гексафторида урана – это наиболее сложный в технологическом плане процесс во всем ядерно-топливном цикле (ЯТЦ) производства урана. Управление фторированием требует постоянного контроля состава агрессивных газов, участвующих в технологическом процессе. Процесс осуществляется автоматическим управляющим комплексом (АСУТП) в соответствии с информацией о составе газовой смеси на различных этапах технологической цепочки. Масс-спектрометрический метод – единственный способ одновременного мониторинга как состава газовых смесей фторирования, так и конечного продукта. Масс-спектрометр, управляющий системой АСУТП, должен обеспечивать точность и динамический диапазон измерений с параметрами, не уступающими параметрам приборов для изотопного анализа. В связи с усовершенствованием технологии очистки  $UF_6$  от сопутствующих газов, масс-спектрометр «Сибирь», управлявший технологическим процессом до последнего времени, перестал удовлетворять требованиям ЯТЦ. По этой причине разработка современного надежного и автоматизированного масс-спектрометра с увеличенным числом аналитических каналов регистрации и повышенной точностью измерений является актуальной задачей. Регистрация информации о составе технологических газов в представленном приборе осуществляется одновременно по шести аналитическим каналам. Пять из этих каналов предназначены для прецизионным измерений легких масс, поэтому один и тот же масс-спектрометр с небольшой модификацией может быть использован для изотопных измерений при решении научных, экологических и медицинских задач. Разработка такого универсального прибора, позволяющего решить большой круг аналитических задач и в других областях техники, также является актуальной задачей.

## **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, включает 137 страниц текста, 44 рисунка, 12 таблиц. Список литературы содержит 54 наименования.

В первой главе диссертации рассмотрены приборные реализации изотопного анализа. Общей особенностью существующих приборов является их узкая специализация, направленность на проведение только одного типа анализа. Это позволяет решать поставленные задачи оптимальным для них образом, однако для решения задач, выходящих за очерченные для приборов рамки, существующие приборные решения не подходят.

Во второй главе приведен обзор принципов конструирования масс-спектрометров для анализа легких масс. Показано, что поставленная задача осложнена необходимостью одновременно с контролем легких газов проводить прецизионное измерение тяжелой компоненты. В этой главе проведена оценка прототипа прибора, описаны недостатки его приборной реализации. Подробно рассмотрено новое ионно-оптическое решение, ставшее основой разрабатываемого прибора, подробно описаны его преимущества. Рассмотрены ионно-оптические решения позволяющие достигнуть требуемого результата.

В третьей главе автор обосновывает выбор конфигурации электродов источника ионов, подробно останавливаясь на эмитансе формируемого ионного пучка разнородных продуктов с минимальной дискриминацией по массе. Приведены результаты расчета и оптимизации ионно-оптической системы источника ионов, которые проводились с использованием программного пакета расчета полей и траекторий Simion-8.

В четвертой главе описываются особенности конструирования основных аналитических узлов прибора с учетом специфики его эксплуатации. В этой главе описана конструкция источника ионов, обеспечивающая его быструю замену и очистку от загрязнения продуктом. В этой главе приведена конструкция масс-анализатора, описана технология изготовления магнитной системы масс-анализатора, обеспечивающая однородность магнитного поля в зазоре не хуже 0,1%. Рассмотрена конструкция камеры масс-анализатора, обеспечивающая формирование входных и выходных плеч ИОС. Детально показана конструкция детекторов ионов в виде цилиндров Фарадея и описана конструкция приемника ионов легких масс.

В пятой главе описана доработка масс-анализатора с учетом параметров реально изготовленного магнита, включая коррекцию выявленных недостатков прибора, изготовленного на основе разработанного комплекта конструкторской документации. По результатам серии испытаний прибора рассмотрены проведенные доработки источника ионов, изменения положения коллекторов тяжелых и легких масс, коррекции входного и выходного плеч ИОС.

### **Степень обоснованности положений и выводов.**

#### **Достоверность и новизна научных положений, сформулированных в диссертации**

Представленное в диссертации новое ионно-оптическое решение базируется на законах движения частиц в ионно-оптических системах и теории транспортировки пучков, основанной на использовании концепции фазового пространства. В работе использовался специализированный программный комплекс, использующий методы математического моделирования распределения потенциалов в ионно-оптических системах, анализа движения частиц в этих системах и представления траекторий движения частиц в координатах фазового пространства. Обоснованность заявленных в диссертации положений и выводов не вызывает сомнений, поскольку все они базируются на ясных физических идеях и подтверждены действующим прототипом прибора, работающим на их основе. Предложенная технология изготовления прецизионного постоянного магнита подтверждена экспериментальными результатами, полученными при испытаниях разработанного масс-спектрометра.

Из пунктов научной новизны следует особо выделить новое ионно-оптическое решение масс-спектрометра, состоящее в пространственном отделении продукта –  $UF_6$  от технологических газов с прецизионной регистрацией их масс-спектра по шести независимым аналитическим каналам.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Значимость результатов диссертации состоит в разработке нового технологического масс-спектрометра для контроля химического состава техно-

логических газов в АСУТП сублиматного производства гексафторида урана, который имеет значимое влияние на народно-хозяйственную деятельность.

Результаты диссертационной работы опубликованы в виде четырех статей в журналах «Масс-спектрометрия», «Научное приборостроение», четырех докладов, а также патенте на полезную модель.

Результаты работы докладывались на молодежной конференции «Научные школы Черногловки-молодежи» 2 июня 2006 г. Черногловка, II Всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» 3-7 сентября 2007 г. Москва, на IV съезде ВМСО III Всероссийская конференция с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» 18-22 мая 2009 г. Москва, на IV Всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» 5-9 сентября 2011 г. Москва.

#### **Рекомендации об использовании результатов диссертации**

Результаты работы могут быть использованы при разработке, анализе и оптимизации ионно-оптических систем источников ионов с электронным ударом, применяемых в масс-спектрометрах с магнитным анализатором. Кроме того так как пять из шести аналитических каналов посвящены прецизионным измерениям легких масс, тот же масс-спектрометр с небольшой модификацией может быть использован для изотопных измерений при решении научных, экологических и медицинских задач. Технические решения, приведенные в диссертации могут быть использованы в ряде организаций, занимающихся разработкой масс-спектрометрической техники, в частности это Учреждение Российской академии наук Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, ЗАО "Научные приборы", Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Московский инженерно-физический институт, Москва, АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», Москва, Федеральное государственное унитарное предприятие российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экс-

периментальной физики, г. Саров Нижегородской обл., Экспериментальный завод научного приборостроения РАН, Черноголовка, Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН, Москва, и его филиал в Черноголовке.

### Дискуссионные положения и рекомендации

Диссертационная работа написана научным языком, богато иллюстрирована и легко читается. Вместе с тем следует заметить, что работа не свободна от некоторых недостатков:

1. На стр. 69 в первом абзаце автор рассматривает влияние магнитного поля, стабилизирующего электронный пучок в ионном источнике, на дискриминацию ионов по массе, вызванную этим полем. Вместе с тем, из оценки следует, что при величине поля 80 э постоянного магнита,  $U_{\text{уск}} = 3$  кВ и принятой геометрии ионного источника даже для минимального  $m/z = 20$  ( $\text{HF}^+$ ) вклад в эмитанс ионного источника оказывается крайне незначительным ( $\Delta x = 10^{-3}$  см,  $\Delta\phi = 2 \cdot 10^{-3}$  рад).
2. На стр. 113 автор говорит о сравнительно близких работах выхода для вольфрама и тантала (4.52 и 4.12 эВ). Реально, разность этих работ выхода соответствует 10-и кратному различию тока эмиссии при одинаковой мощности подогрева. Кроме того, было бы полезным проанализировать другие катодные материалы с целью увеличения срока жизни катода за счет меньшей мощности подогрева.
3. В техническом решении полюсных наконечников постоянного магнита с целью уменьшения эффекта краевого поля по периметру наконечников выполнены подъемы основного металла. Было бы полезным сравнить этот подход с классическим подходом магнитных экранов типа шунта Герцога.
4. В ряде мест встречаются досадные помарки:
  - В табл. 1 на стр. 37 в качестве изотопа с минимальной массой приведен  $^{234}\text{U}$ , а массы осколочных ионов приведены исходя из изотопа  $^{235}\text{U}$ ;

- На стр. 55 приведено ошибочное значение энергии теплового движения при комнатной температуре  $3.8 \cdot 10^{-3}$  вместо  $2.5 \cdot 10^{-2}$  эВ;
- На стр. 122 приведены данные по чувствительности прибора к основным компонентам технологической смеси газов, соответствующей ТЗ, но отсутствуют данные по реальной чувствительности, которая, вероятно, выше.

В заключении отметим, что указанные недостатки не влияют на общее положительное впечатление о работе и не снижают её научной и практической ценности.

### **Соответствие диссертации требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертация Кузьмина Д. Н. «Масс-спектрометр с постоянным магнитом для контроля химического состава технологических газов в АСУТП сублиматного производства гексафторида урана» представляет собой законченную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном и техническом уровне. Представленные в работе результаты обеспечивают решение задачи создания системы высокопрецизионного химического масс-спектрометра с масс-спектрографическим режимом регистрации, специализированного для задачи контроля и управления технологическим производством гексафторида урана в ЯТЦ.

Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, сопровождается необходимыми пояснениями, рисунками, графиками, расчетами, оформлена аккуратно, изложена технически квалифицированно и грамотно. Каждая глава и работа в целом сопровождается выводами, в сжатом виде отражающими основные результаты работы.

Автореферат, представленный на 16 страницах, полностью отражает содержание диссертационной работы, основных ее этапов, сопровождается перечислением основных результатов и выводов по работе, а также списком публикаций автора по теме диссертационной работы.

Диссертация соответствует специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», и удовлетворяет критериям Положения о присуждении учёной степени кандидата наук, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор Кузьмин Денис Николаевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании научного семинара ИНЭПХФ РАН им. В.Л. Тальрозе 28 мая 2015 г., протокол № 02ф-2015.

Главный научный сотрудник лаборатории «Масс-спектрометрия в энергетике и экологии» (Ф006),  
доктор физ.-мат. наук.  
E-Mail: [zelenov@bineap.ac.ru](mailto:zelenov@bineap.ac.ru)  
Раб.тел.: 8(916)6801645

Владислав Валерьевич  
ЗЕЛЕНОВ

Заведующий лабораторией «Масс-спектрометрия в энергетике и экологии» (Ф006),  
кандидат физ.-мат. наук.  
E-Mail: [kozlovsk@bineap.ac.ru](mailto:kozlovsk@bineap.ac.ru)  
Раб.тел.: 8(916)6801645

Вячеслав Иванович  
КОЗЛОВСКИЙ