ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2027, № 1

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.072.8+53.172.17

КРИОГЕННАЯ ГАЗОНАПОЛНЕННАЯ ЯЧЕЙКА ОХЛАЖДЕНИЯ ИОНОВ

©2027 г. В. Ю. Веденеев*, А. М. Родин, А. С. Новоселов, А. В. Гуляев, А.В. Гуляева, А. Б. Комаров, А. В. Подшибякин, В. С. Саламатин, Е. В. Чернышева, С. А. Юхимчук

Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

**E-mail: vedeneev@jinr.ru*

Поступила в редакцию 10.07.2026

После доработки 17.09.2026

Принята к публикации 27.10.2026

В лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создается новая экспериментальная установка для прецизионных измерений масс тяжелейших нуклидов (с относительной разрешающей способностью порядка $\Delta M/M \sim 10^{-7}$ и временем анализа около 100 мс). Установка включает в себя криогенную газонаполненную ячейку охлаждения ионов и многоотражательный времяпролетный масс-спектрометр. Одним из ключевых узлов такого комплекса является уже построенная и проходящая стендовые испытания криогенная газонаполненная ячейка охлаждения ионов – продуктов реакций с тяжелыми ионами. Ячейка является эффективным инструментом для преобразования потока высокоэнергетических продуктов реакций в пучок ионов малой энергии (около 10 эВ) с малым энергетическим разбросом и эмиттансом пучка, подходящим для прецизионного масс-спектрометрического анализа. Описаны механический дизайн и общая компоновка, отдельно рассмотрены составные части газонаполненной ячейки; представлены вакуумная схема и схема подачи буферного газа, а также результаты по охлаждению ячейки и масс-спектрометрическому анализу остаточных газов.

Ключевые слова: Криогенная система, газонаполненная ячейка охлаждения продуктов реакций, ядерные реакции с тяжелыми ионами, масс-спектрометрия ядер.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос эффективного преобразования пучков продуктов, производимых в ядерных реакциях при высокой энергии и больших выходах, в низкоэнергетические пучки с малым выходом и малым разбросом по энергии всегда был большой проблемой с тех пор, как начались эксперименты в ядерной физике. В течение последних десятков лет тенденцией стали так называемые ионные ловушки, призванные затормозить высокоэнергетические ионы в атмосфере инертных газов, откуда они далее вытягиваются потоком газа и электрическими

полями. Данный метод базируется на технике сепарации продуктов реакций на лету с ионным гидом (ion-guide isotope-separator on-line, IGISOL) [1], что позволяет получать термализованые ионы, образованные в результате реакции слияния и в реакциях фрагментации для последующих экспериментов. В дальнейшем технология остановки продуктов в инертных газах распространилась на различные ядерные реакции для получения пучков радионуклидов всех известных элементов.

В лаборатории ядерных реакций создается новая установка – многоотражательный времяпролетный масс-спектрометр, предназначенный для прецизионного измерения масс тяжелейших ядер [2]. Один из его узлов – криогенная газонаполненная ячейка охлаждения ионов продуктов ядерных реакций – уже готов, собран и проходит офлайн-тестирование. Одним из самых актуальных и важнейших направлений в фундаментальной ядерной физике является синтез и исследование свойств сверхтяжелых элементов. В последние десятилетия в ЛЯР ОИЯИ было синтезировано несколько новых элементов (с порядковыми номерами 113–118) [3]. Создание методики газовой сепарации продуктов реакции “на лету” (Gas ISOL) позволяет проводить анализ короткоживущих изотопов с временем жизни около 30 мс.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Поскольку ячейка спроектирована для работы при температуре около 40 К, ее механический дизайн связан с трудностями по обеспечению нормальной и стабильной работы. Такие низкие температуры необходимы в первую очередь для того, чтобы удалить примеси остаточных газов. Ионы продуктов реакций образуют с водяным паром, азотом, кислородом и высокомолекулярными органическими соединениями устойчивые конгломераты, препятствующие дальнейшему анализу продуктов. Из табличных данных известно, что при температурах в диапазоне 30–40 К происходит уменьшение концентрации основных примесей воздуха, кроме водорода, неона и самого буферного газа гелия. В табл. 1 приведены паспортные значения концентраций основных примесей гелия чистотой 99.99999%, используемого нами. В этой же таблице даны давления насыщенных паров этих примесей при температуре 35 К.

Таблица 1. Относительные концентрации основных примесей в гелии, используемом в тестах [4]

Газ, отн. ед. (объемные)	Содержание, отн. ед. (293 К)	$P_{нас}$ (35 К), торр
He *	1.0	>750
Ne	$\leq 1.5\cdot10^{-8}$	>750
O_2+Ar	$\leq 1\cdot10^{-8}$	$1.5\cdot10^{-4}$
N_2	$\leq 5\cdot10^{-8}$	$1.5\cdot10^{-4}$

H_2	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	>750
CO_2 + CO,	$\leq 0.5 \cdot 10^{-8}$	$<7.5 \cdot 10^{-10}$
CH_4	$\leq 0.5 \cdot 10^{-8}$	$<7.5 \cdot 10^{-7}$
H_2O	$\leq 2 \cdot 10^{-6}$	$<7.5 \cdot 10^{-12}$

Для реализации была выбрана конструкция, основанная на аналогичной ячейке, работающей на установке SHIPTRAP в GSI, Дармштадт [5]. Схематичное изображение криогенной ячейки представлено ниже.

Рис. 1. Общий вид газонаполненной ячейки охлаждения ионов

На рис. 1 представлена криогенная газонаполненная ячейка, ее составные части следующие:

– две камеры, коаксиально расположенные одна относительно другой по типу «термоса», выполненные из нержавеющей стали. Вакуум во внешней камере является теплоизолятором. Внутренняя камера покрыта слоем меди толщиной 2 мм для обеспечения выравнивания температуры по всей поверхности рабочей камеры. К тому же, блестящее покрытие полированной меди уменьшает радиационную теплоотдачу внутренней камере вследствие высокой отражательной способности;

– входное окно с фольгой и дисковым электродом. Толщина фольги подбирается таким образом, чтобы ионы теряли примерно 90% своей энергии перед входом в газовую ячейку, где они уже тормозятся за счет соударений с атомами гелия;

– восьмиэлектродная система (клетка) для создания внутри постоянного однородного электрического поля, под воздействием которого термализованные ионы движутся в направлении к конусу;

– многоэлектродный конус, к которому подводится переменный потенциал, а также градиент постоянного напряжения – для обеспечения отталкивающей силы, предотвращающей столкновение ионов с электродами. Радиочастотная воронка фокусирует выходящие ионы в пучок и проводит их дальше по оси к соплу;

– сопло Лаваля, через которое ионы выводятся из ячейки в сверхзвуковой газовой струе. Выходное сопло электрически изолировано от остальной части, оно имеет отрицательный потенциал в несколько Вольт для вывода положительно заряженных ионов;

– транспортирующая многоэлектродная газонаполненная квадрупольная система служит для транспортировки ионов в узел анализатора, а нейтральный газ откачивается турбомолекулярным насосом по мере развала струи.

2.1. Внешняя и внутренняя камеры

Внешняя камера выполнена из нержавеющей стали и имеет длину 650 мм, диаметр 650 мм и толщину стенки 5 мм. Внутренняя камера выполнена также из нержавеющей стали с толщиной стенки 5 мм. Длина внутренней камеры 460 мм, а диаметр – 400 мм. Внутренняя камера крепится на 8 коротких (274 мм) и 4 длинных (394 мм) подвесах (спицах), выполненных из сплава инконель Х-750 (ХН70МВЮ) диаметром 2 мм. Данный сплав состоит из 73% никеля, 18% хрома, 6.8% железа, доля остальных добавок – 2.2% (в основном это титан и алюминий), это обеспечивает высокие значения прочности и предела текучести, небольшие значения удельной теплопроводность и коэффициента температурного расширения.

Рис. 2. Ячейка в сборе …

На рис. 2 видны держащие внутреннюю камеру спицы из сплава ХН70МВТЮ. Верхние и нижние спицы позволяют центрировать камеру в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а боковые – корректировать угол соосности. Кроме того, такое решение заметно снижает температурные деформации, возникающие при охлаждении камеры.

Медная оболочка для внутренней камеры была изготовлена из двухмиллиметрового листа методом лазерной раскройки. Затем выкройке была придана необходимая форма и она была стянута по трем линиям на обечайке и на торцевых фланцах так, чтобы образовался единый медный контур. Для лучшего теплового контакта в качестве прокладки между нержавеющим корпусом и медной оболочкой была помещена индиевая фольга толщиной 100 мкм. Это позволяет нивелировать дефекты округлости и шероховатости поверхностей камеры, а также обеспечить хороший тепловой контакт между вакуумной камерой и медной оболочкой. Использование оболочки существенно уменьшило неоднородности температур в разных точках внутренней камеры. В разд. 4 приведены экспериментальные данные разности температур по поверхности холодной камеры.

Для съема тепла с рабочей камеры использовались листы меди толщиной 0.5 мм, набранные в пакет по 8 штук, по 2 пакета с каждой стороны. Пакет обладает меньшей жесткостью, чем цельный лист аналогичной толщины, он не так подвержен деформации с возможным разрушением конструкции при температурном расширении (в данном случае – сжатии). Четыре пакета шириной по 100 мм имеют схожие сечения ($4 \cdot 8 \cdot 0.5 \times 100 = 1600$ мм^2) с медной оболочкой, что не препятствует нормальному отвода тепла с рабочей камеры и не является своеобразным “бутылочным горлышком”.

Для уменьшения теплопритока путем лучистой теплопередачи от теплой камеры к холодной был также смонтирован тепловой экран, изготовленный из листа алюминия марки

АД0 толщиной 1 мм, покрытый полиэтиленовой пленкой с алюминиевым напылением. Степень черноты пленки составляет σ=0.04. Лист закрывает основную площадь излучения нержавеющей стали, ее обечайку, боковые фланцы, уменьшая тем самым тепловую нагрузку на холодную камеру, он теплоизолирован от внешней камеры с помощью стоек диаметром 5 мм из полипропилена. Пленкой проклеена вся внешняя камера изнутри для минимизации лучистой теплопередачи.

Охлаждение проводилось криорефрижератором Sumitomo cold head RDK-500B, представляющим собой голову-теплообменник (cold head) и отдельно стоящий компрессор Sumitomo Cryogenics F-70 мощностью 7 кВт с водяным охлаждением, которые соединены шлангами для прокачки гелия, постоянно циркулирующего в замкнутом контуре. В смонтированном виде они представлены на рис. 3.

Рис. 3. Система охлаждения …

Теплообменник криорефрижератора соединен со специальной медной плитой размером 400×170×7 мм^3, на которой смонтированы медные пакеты-теплосъемники, описанные выше. Для предварительного охлаждения газа медной трубке была придана форма змеевика, а сама трубка впаяна припоем ПОС-61 в специально отфрезерованную под нужную форму пластину из такой же бескислородной меди М00б, которая находится в непосредственном контакте с основной медной плитой и плотно прижата стальным листом, что исключает ее деформацию вследствие силы тяжести и теплового расширения. Газ проходит по змеевику длиной 2 м, что при потоке около 1 торр·л/с достаточно для его охлаждения до 40 К. Более подробно система подачи рабочего газа описана далее в разд. 3. На рис. 4 представлена сборка с отсоединенной головкой криорефрижератора. Сверху находится основная плита, к которой по центру крепится головка. Сбоку к ней присоединены медные пакеты из листов, прикрепленные к обечайке и снимающие тепло с камеры, под плитой – медная пластина с впаянной трубкой подачи газа, придерживаемая снизу стальным листом.

Рис. 4. Сборка теплосъемника охлаждения ячейки с отсоединенной криоголовкой

2.2. Внутреннее наполнение рабочей камеры ячейки

Внутренняя начинка камеры представляет собой специально сконструированную многоэлектродную систему, необходимую для создания электростатического поля с вектором напряженности, направленным вдоль оси камеры и, соответственно, продвижения ионов испарительных остатков. Непосредственно в камере находятся четыре электродных системы: входное окно, клетка постоянного поля, многоэлектродный радиочастотный конус, выходное сопло Лаваля (см. рис. 1). Рассмотрим их поподробнее.

2.3. Входное окно

Вследствие большого поперечного размера изображения в фокальной плоскости сепаратора, размер которого может превышать 50 мм, в одной из плоскостей размер входного окна был увеличен с 60 мм [5] до 92 мм. Основным элементом окна является металлическая фольга, толщина и материал которой выбираются исходя из кинетической энергии остатков испарения и их зарядового числа. Оптимальная толщина определяется по таблице торможений и длин свободного пробега заряженных частиц в веществе в программном пакете SRIM [6], она рассчитана таким образом, чтобы убрать значительную часть энергии ионов так, чтобы они остановились в центре газонаполненной ячейки при данном давлении буферного газа. Фольга монтируется на специально сконструированный фланец из нержавеющей стали и поддерживается между двух пластин, имеющих сотовую структуру с коэффициентом прозрачности 92%. Для того чтобы предотвратить повреждения фольги во время охлаждения, рекомендуется использовать материал, который деформируется меньше, чем окружающие его металлы – фланец и прутки решетки. Основной компонент – нержавеющая сталь – имеет коэффициент относительного температурного расширения $\beta=16\cdot10^{-6}$ K^{-1}, тогда как коэффициент температурного расширения титана равен $\beta=8.6\cdot10^{-6}$ K^{-1}, что является приемлемым выбором материала для фольги, поскольку деформация титана меньше, чем у нержавеющей стали, и она не будет вызывать механических напряжений в фольге [5]. Для уплотнения фольги используется индиевая проволока, которая закладывается по периметру окна и обеспечивает герметизацию сборки.

В отличие от криогенной газовой ячейки, установленной на SHIP в GSI (Дармштадт), в ЛЯР установлена новая конструкция входного окна без изолятора, т. е. фольга находится под нулевым потенциалом, а выравнивающий потенциал прикладывается к диску с намотанной на отверстие тонкой вольфрамовой проволокой с золотым покрытием диаметром 20 мкм. Намотка проводилась сеткой с шагом 2 мм по горизонтали и вертикали, что дает почти 100-процентную прозрачность и достаточно равномерное электростатическое поле.

Рис. 5. Входное окно с установленным диском …

2.4. Клетка постоянного электростатического поля

Электростатическая градиентная клетка (DC cage) представляет из себя цилиндр, разделенный на 8 сегментов диаметром 280 мм и длиной 28.4 мм с расстоянием между соседними электродами 1 мм. Таким образом, получается конструкция длиной 234.2 мм. Ионы испарительных остатков тормозятся в газе объема клетки, как было сказано ранее, а затем проходят ее под действием градиента электростатического поля. Потенциалы подаются на первый и последний электроды – DC_{max} и DC_{min}, остальные запитываются через делитель

напряжения, состоящий из 7 одинаковых резисторов по 100 кОм каждый. Таким образом, создается электростатическое поле с равномерным распределением напряженности по оси *Z* пучка.

Рис. 6. Клетка постоянного напряжения

2.5. Радиочастотная воронка

Конус, предназначенный для фокусировки ионов испарительных остатков, представляет собой набор из 76 дисков, выполненных из нержавеющей стали, с отверстиями в центре постоянно уменьшающегося диаметра в направлении сопла Лаваля. Таким образом, уложенные один на другой с определенным промежутком диски, разделенные изоляторами, образуют геометрию конуса или воронки. Толщина первых 56 пластин – 1 мм, расстояние между соседними тоже 1 мм, толщина последних 20–0.5 мм, расстояние между ними 0.5 мм. Такая геометрия позволяет более точно и равномерно выстроить электростатическое поле возле одного из важнейших элементов газовой ячейки – выхода, газового сопла Лаваля. Диаметр отверстий у пластин начинается от 260 мм и с шагом 4 мм уменьшается до 5 мм по ходу движения ионов. Вдоль всей воронки через делитель напряжения приложены потенциалы, образующие тянущее электростатическое поле, создающее силу $\mathbf{F}_{DC}$, а также переменное напряжение, причем между двумя соседними электродами фаза смещена на π, т. е. колебания напряжений каждой пары соседних электродов происходят в противофазе. В результате создается отталкивающая сила $\mathbf{F}_{RF}$ для предотвращения столкновения ионов с дисками воронки.

Суммарное действие силы, действующей на ион $\mathbf{F}_{eff}$, является суперпозицией (векторной суммой) сил $\mathbf{F}_{RF}$ и $\mathbf{F}_{DC}$. Эта сила позволяет ионам дрейфовать вдоль линий электростатических полей, не оседая на электроды воронки, и направляться напрямую к выходному соплу.

Рис. 7. Фотография многоэлектродной радиочастотной воронки …

Основа схемы обвязки взята из статьи [5].

2.6. Сопло Лаваля

Выходное сопло Лаваля используется для вывода продуктов реакций из камеры совместно с буферным газом. Конструктивно оно представляет собой электрически изолированный диск, приваренный к фланцу стандарта DN100CF, в центре которого располагается сопло с диаметром шейки 0.6 мм. Изолятор, изготовленный из керамики ВК 94-1 (22ХС) на основе оксида алюминия Al_2O_3, соединялся с манжетами, изготовленными из сплава 29 НК-ВИ (ковар) посредством пайки высокотемпературным припоем ПЖК-1000.

Ковар обладает коэффициентом линейного расширения, близким к таковому у керамики, что дает возможность использования конструкции в криогенике, также ковар хорошо сваривается с нержавеющей сталью дуговой сваркой в среде аргона.

Рис. 8. Сопло Лаваля, смонтированное на фланец …

На рис. 8 изображены внешний вид сопла, смонтированного на вакуумном фланце, и разрез с размерами.

Ионы испарительных остатков при этом в районе сопла буквально “вмораживаются” в газ, т. е. движутся преимущественно уже с потоком гелия, скорость которого на выходе может достигать 1700 м/с, при этом испарительные остатки не испытывают ван-дер-ваальсова взаимодействия, причем энергия ионов на выходе равняется примерно 10 эВ.

2.7. Радиочастотный квадрупольный канал

Для транспортировки ионов продуктов на выходе из ячейки сразу после сопла Лаваля смонтирован радиочастотный газонаполненный квадрупольный транспортирующий канал или радиочастотный квадруполь (РЧК). На камере находится мощный турбомолекулярный насос Pfeiffer Vacuum HiPace 1800, смонтированный на фланце стандарта DN200CF, производительностью 1800 л/с. Такая производительность необходима, чтобы полностью избавить ионы пробы от буферного газа. Поскольку РЧК работает при давлении буферного газа порядка 10^{-2} торр, насос работает на повышенном давлении и испытывает значительную нагрузку, требующую хорошего водяного охлаждения.

Рис. 9. Квадрупольный газонаполненный радиочастотный транспортный канал

Сам квадрупольный ионный канал представляет собой сегментированный квадруполь с диаметром электродов 11 мм и диаметром вписанной окружности 10 мм. Число сегментов каждого из четырех электродов равняется 21. Сегменты, длина которых равна 19.8 мм, разделены изоляторами, и расстояния между каждой парой сегментов составляют 0.1 мм, что в сумме дает длину транспортирующего канала 417.8 мм. Сегментированность дает возможность приложить к квадруполю тянущий градиент напряжения. Также приложено радиочастотное напряжение с частотой 1 МГц и напряжением 200 В пик-пик, т. е. примерно так, как это сделано в радиочастотной воронке, причем соседние из электродов квадруполя получают переменное напряжение со сдвигом фазы на π, что дает квадрупольный момент, создающий отталкивающую силу.

На конце транспортирующего канала находится выходная апертура диаметром 5 мм, через которую уже охлажденные ионы проходят далее в узел анализатора.

2.8. Система регистрации ионов

Система регистрации представляет собой сборку из дисков с отверстиями в центре, представленную на рис. 10.

Рис. 10. Схема и общий вид системы регистрации ионов на выходе …

На выходе из апертуры гида на расстоянии 9 мм находится алюминиевая фольга толщиной 0.75 мкм, в которую имплантируются ионы. К сборке с фольгой прикладывается потенциал, равный 1700 В. Экспериментально установлено, что энергии 1700 эВ достаточно для того, чтобы время диффузии имплантированных ионов значительно превышало 4 с. Это создает комфортные условия для работы с источником ^{223}Ra, дочерним ядром которого является ^{219}Rn с временем жизни 3.96 с. Более подробно манипуляции описаны в работе [7]. Ионы детектируются полупроводниковым PIPS-детектором.

3. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА И СИСТЕМА ПОДАЧИ РАБОЧЕГО ГАЗА

Вакуумная система реализована на основе четырех сухих спиральных насосов Edwards XDS35 и трех турбомолекулярных насосов Pfeiffer Vacuum HiPace. Запорная арматура состоит из пневматических и ручных запорных клапанов. Вакуумная схема представлена на рис. 11

Рис. 11. Вакуумная схема криогенной газонаполненной ячейки

Откачка внутренней камеры происходит предварительно на этапе приведения криогенной газонаполненной ячейки в рабочее состояние. Специально сконструированное устройство в виде штока через уплотнение Вильсона подводится к гайке углового цельнометаллического клапана и открывает доступ к откачке. На этом этапе камера откачивается до давления порядка 10^{-6}–10^{-5} торр. Затем угловой клапан откачки внутренней камеры перекрывается и выводится из зацепления со штоком для предотвращения теплопритока. И только после этого запускается крионасос. Охлаждение понижает давление в камере до 10^{-9}–10^{-8} торр. Следующим действием в рабочую камеру подается буферный газ.

Рис. 12. Схема подачи буферного газа в рабочую камеру …

Функциональная схема системы подачи газа в ячейку представлена на рис. 12. В качестве основного рабочего газа, который постоянно прокачивается через ячейку, используется сверхчистый гелий (чистота 99.9999%). В рабочем режиме расход газа не превышает 1 торр·л/с, что регулируется специальным проточным регулятором расхода газа (РРГ). Он автоматически подстраивается под необходимое давление внутри камеры; нормальное рабочее давление составляет 40–60 торр при комнатной температуре и 5–7 торр при температуре 40 К. Трубка диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм, выполненная из нержавеющей стали AISI 316, имеет терморазрыв, предотвращающий как теплопередачу по

ней к холодной части, так и механические повреждения трассы, вызванные тепловым расширением металла. Тепловой разрыв представляет собой сильфон диаметром 12.7 мм с толщиной стенки менее 0.1 мм, что снижает теплопередачу по нему до приемлемого уровня. Далее следуют разъемное штуцерное соединение шар-конус и переход со стальной на медную трубку того же диаметра. Это необходимо для возможности сборки-разборки конструкции подачи газа. После предварительного охлаждения газ по трубке подается в рабочую камеру через вакуумный разъем типа Swagelok.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЯЧЕЙКИ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ

На рис. 13 стрелками изображена схема размещения температурных датчиков на криогенной части ячейки. Терморезисторы располагаются на внешней стороне камеры в трех точках: на плите рядом с криоголовкой *1*, на двух торцевых фланцах внутренней камеры *2, 3*, а также на импровизированном кресте внутри камеры для измерения температуры газа, что изображено на рис. 14.

Рис. 13. Схема размещения датчиков терморезисторов на криогенной части ячейки

Рис. 14. Крепление датчиков терморезисторов на фланце …

Использовались терморезисторы Cernox CX-1050-1.4L от Lakeshore Cryotronix с температурным диапазоном 1.5–325 К, проиллюстрированные на рис. 14. Показания температур снимались монитором Model 224 от Lakeshore Cryotronix. На графике рис. 15 приведены изменения температуры в зависимости от времени в процессе охлаждения ячейки в трех точках: на плите в непосредственном контакте с криоголовкой (кривая *1*) и у двух торцевых фланцев внутренней камеры (кривые *2, 3*).

Рис. 15. Тесты охлаждения криоячейки и напуска буферного газа.

Тестирование охлаждения ячейки [8] показало, что температура внутри рабочей камеры достигает 30 К за время 35±5 ч, причем разница в температурах в разных точках камеры не превышает 1 К. При включении подачи гелия после полного охлаждения температура поднимается незначительно и останавливается на значении 35±1 К.

Контроль состава остаточных газов осуществлялся с помощью квадрупольного спектрометра Pfeiffer Vacuum Prisma pro QMG 250, представленного на рис. 16. Отбор пробы происходит через отверстие внутренней камеры диаметром 2 мм, выполненное на боковом фланце. С помощью углового цельнометаллического дозирующего вентиля, приводимого в действие вручную, проба по трубке диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм, выполненной из

нержавеющей стали, попадает в объем анализатора, предварительно откачанный до давления около 10^{-8} торр.

Рис. 16. Общий вид сборки с квадрупольным масс-спектрометром для анализа …

На рис. 17 представлены массовые спектры остаточных газов, измеренные при температурах буферного газа в ячейке 293 и 35 К соответственно. В обоих измерениях давление в камере масс-спектрометра составляло $5 \cdot 10^{-6}$ торр, а следовательно, и интенсивность линии гелия одинаковая. На рисунке соответствующими символами обозначены линии основных примесей, интенсивность которых уменьшалась при охлаждении внутренней камеры (буферного газа) до 35 К. Количественные данные из этих спектров извлечь не представляется возможным, так как коммуникации канала отбора пробы и вакуумная камера масс-спектрометра находились при комнатной температуре, т.е. уровни газоотделения в холодной и теплой камерах различаются.

Рис. 17. Качественный состав пробы из внутренней камеры …

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне создается новая установка для прецизионного измерения масс сверхтяжелых ядер. Один из важнейших узлов – криогенная газонаполненная ячейка охлаждения ионов – создана, собрана и проходит испытания. Криогенные тесты проведены [8]. За 35±5 ч камера достигла температуры 30 К, а температурные отклонения в разных точках остановились на значениях, не превышающих 1 К. При охлаждении газонаполненной ячейки до рабочих температур уровень всех нежелательных примесей уменьшается, практически полностью исключая их из рабочего газа, что подтверждают масс-спектрометрические исследования остаточных газов. Подобраны оптимальные параметры для электродов ячейки, а также резонансные состояния для ВЧ-системы. Создана система управления откачкой, криогеникой, подачей газа и напряжениями на электродах на базе программного пакета LabView. Уже проведены испытания с внутренним источником-эманатором ^{219}Rn, что подробно описано в работе [6]. Эффективность экстракции ионов составила 49.3±3.0% для давления 50 торр при комнатной температуре. Дальнейшие тесты будут включать измерения эффективности и времени экстракции ионов при криогенных температурах с помощью полупроводникового детектора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moore I. D., Dendooven P., Ärje J.* Hyperfine Interac. 2014. V. 223. P. 17. https://doi.org/10.1007/s10751-013-0871-0
2. *Yavor M.I., Gall N.R., Muradymov M.Z., et al.* J. Anal. Chem. 2023. V. 78. № 14. P. 1906. https://doi.org/10.1134/S1061934823140101
3. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K.* Nucl. Phys. A. 2015. V. 944. P. 62. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003
4. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.* Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. С. 254.
5. *Droese C., Eliseev S.A., Blaum K., et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 2014. V. 338. P. 126. http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.08.004.
6. Программный пакет SRIM. http://srim.org/
7. *Opichal A., Novoselov A. S., Rodin A. M., et al.* J.Instrum. 2025. V. 20. P. P04017. https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/04/P04017
8. *Vedeneev V.Y., Rodin A.M., Krupa L. et al.* Phys. Part. Nuclei Lett. 2024. V. 21. P. 611. https://doi.org/10.1134/S154747712470078X

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Общий вид газонаполненной ячейки охлаждения ионов

Рис. 2. Ячейка в сборе. Фланцы одной из сторон (на выходе) открыты для наглядности

Рис. 3. Система охлаждения. На левой части рисунка вверху конструкции находится голова-теплообменник, справа изображен отдельно стоящий гелиевый компрессор

Рис. 4. Сборка теплосъемника охлаждения ячейки с отсоединенной криоголовкой

Рис. 5. Входное окно с установленным диском и алюминиевой фольгой (без сотовой структуры поддержки и сетки)

Рис. 6. Клетка постоянного напряжения (градиентная клетка), смонтированная на фланец

Рис. 7. Фотография многоэлектродной радиочастотной воронки с установленной обвязкой из пассивных радиоэлементов

Рис. 8. Сопло Лаваля, смонтированное на фланец, и эскиз разреза с основными размерами

Рис. 9. Квадрупольный радиочастотный ионный гид

Рис. 10. Схема и общий вид системы регистрации ионов на выходе из криогенной газонаполненной ячейки охлаждения ионов

Рис. 11. Вакуумная схема криогенной газонаполненной ячейки: ТК и ХК – внешняя “теплая” и внутренняя “холодная” камеры, РЧК – камера радиочастотного квадруполя, МБ – манометры типа баратрон, ДП – датчики давления Пирани, ДХК – вакуумные датчики с холодным катодом, ТМН – турбомолекулярные насосы, ФВН – форвакуумные спиральные насосы, КПГ – клапан контроля потока газа, УКР – угловые клапаны с ручным приводом, УКП – угловые клапаны с пневматическим приводом, КП – клапан продувки, ПВЗ – прямопролетные вакуумные затворы.

Рис. 12. Схема подачи буферного газа в рабочую камеру криогенной газонаполненной ячейки: СРД – сосуд, работающий под давлением с рабочим газом (гелием), РМ – редуктор с манометрами, УКР – угловые клапаны с ручным приводом, РРГ – регулятор расхода газа, ВВ – фланцевые вакуумно-плотные вводы в камеры, МБ – манометр типа баратрон, ТР – сильфонный тепловой разрыв, ШС – разъемное штуцерное соединение стальной и медной трубок, ЗТ – змеевик теплообменника, ТК – внешняя камера, ХК – внутренняя камера, ФВН – спиральный вакуумный насос

Рис. 13. Схема размещения датчиков терморезисторов на криогенной части ячейки: *1* – криоголовка; *2, 3* – торцевые фланцах внутренней камеры

Рис. 14. Крепление датчиков терморезисторов на фланце и импровизированном кресте внутри камеры

Рис. 15. Тесты охлаждения криоячейки и подачи буферного газа. Приведены зависимости, измеренные в трех точках: на плите в непосредственном контакте с криоголовкой (черная линия *1*) и у двух торцевых фланцев внутренней камеры (красная и синяя линии *2, 3*)

Рис. 16. Общий вид сборки с квадрупольным масс-спектрометром для анализа остаточных газов во внутренней камере

Рис. 17. Качественный состав пробы из внутренней камеры криогенной газонаполненной ячейки охлаждения ионов

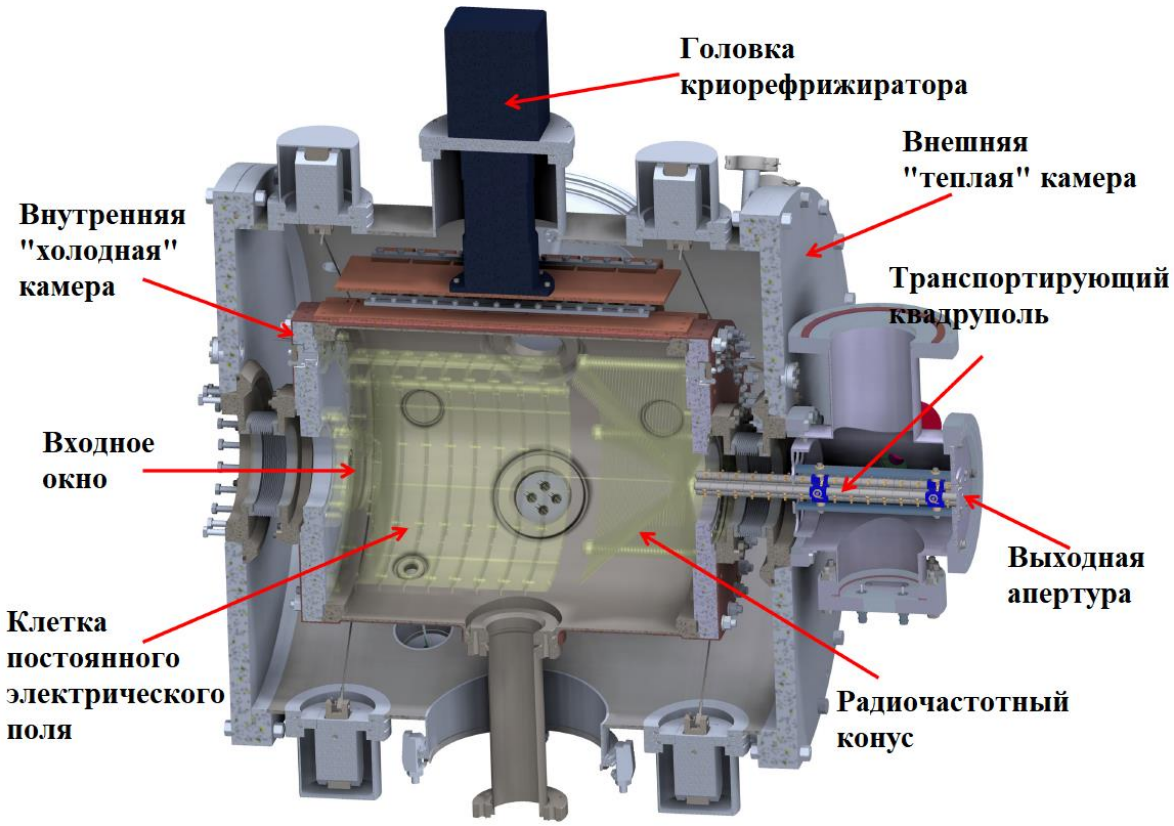

Головка
криорефрижиратора
Внешняя
"теплая" камера
Внутренняя
"холодная"
камера
Транспортирующий
квадруполь
Входное
окно
Выходная
апертура
Клетка
постоянного
электрического
поля
Радиочастотный
конус

Рис. 1

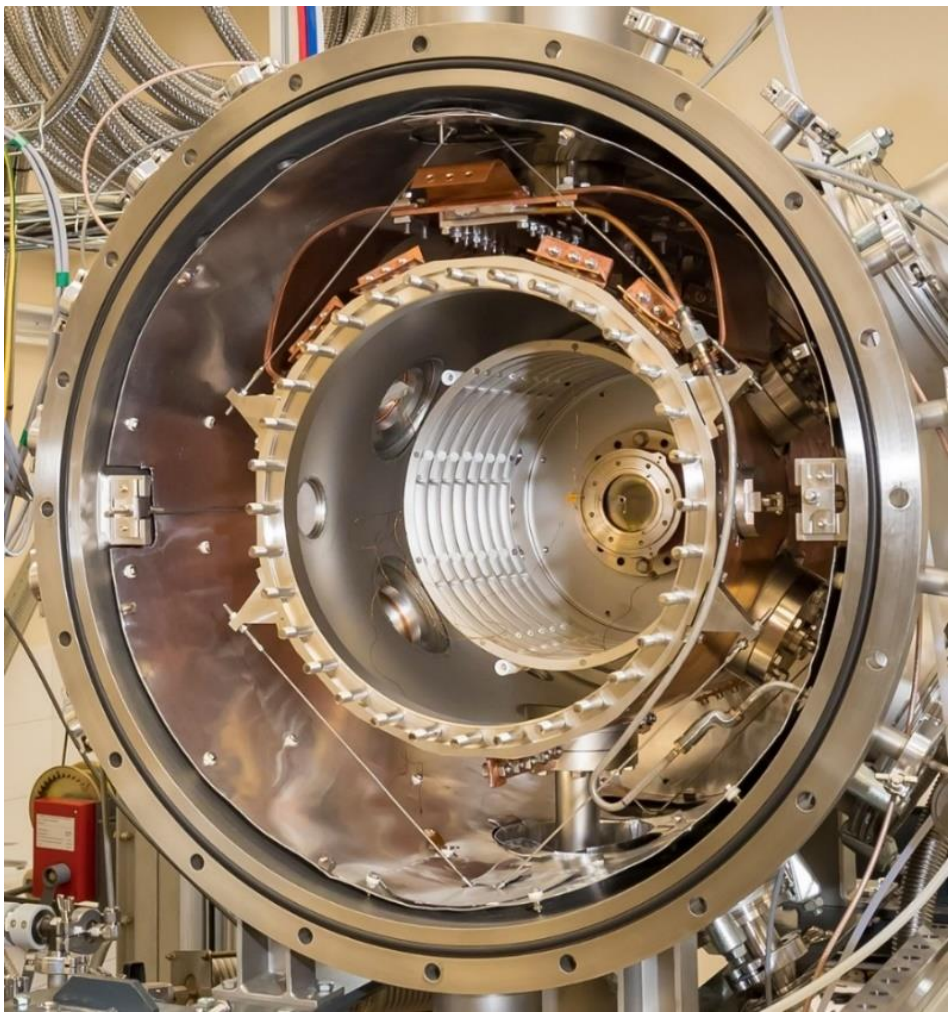


Рис. 2.

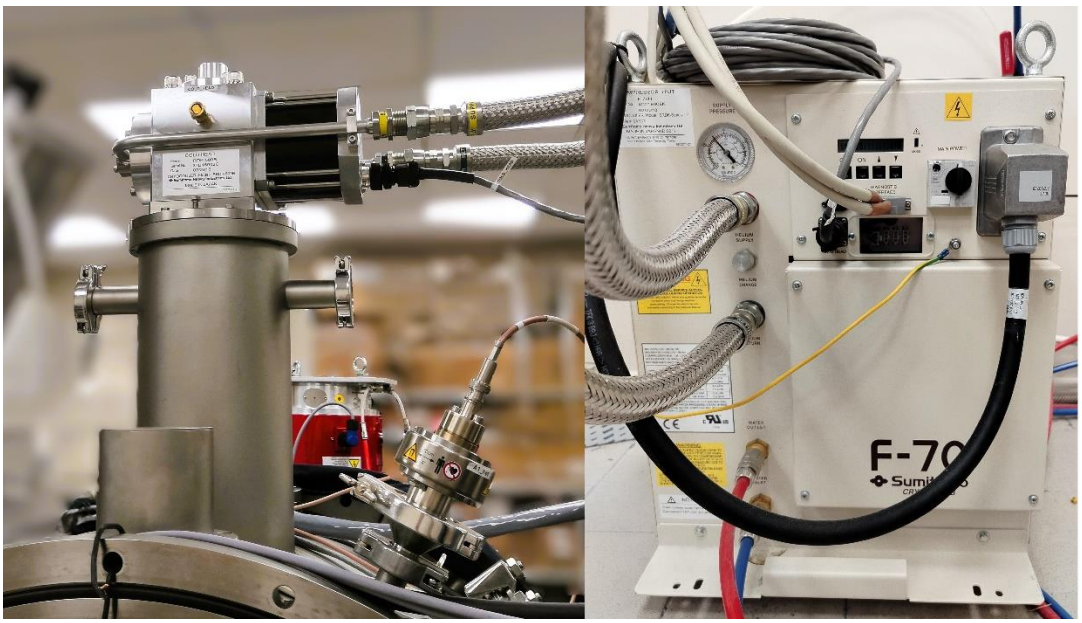


Рис. 3.

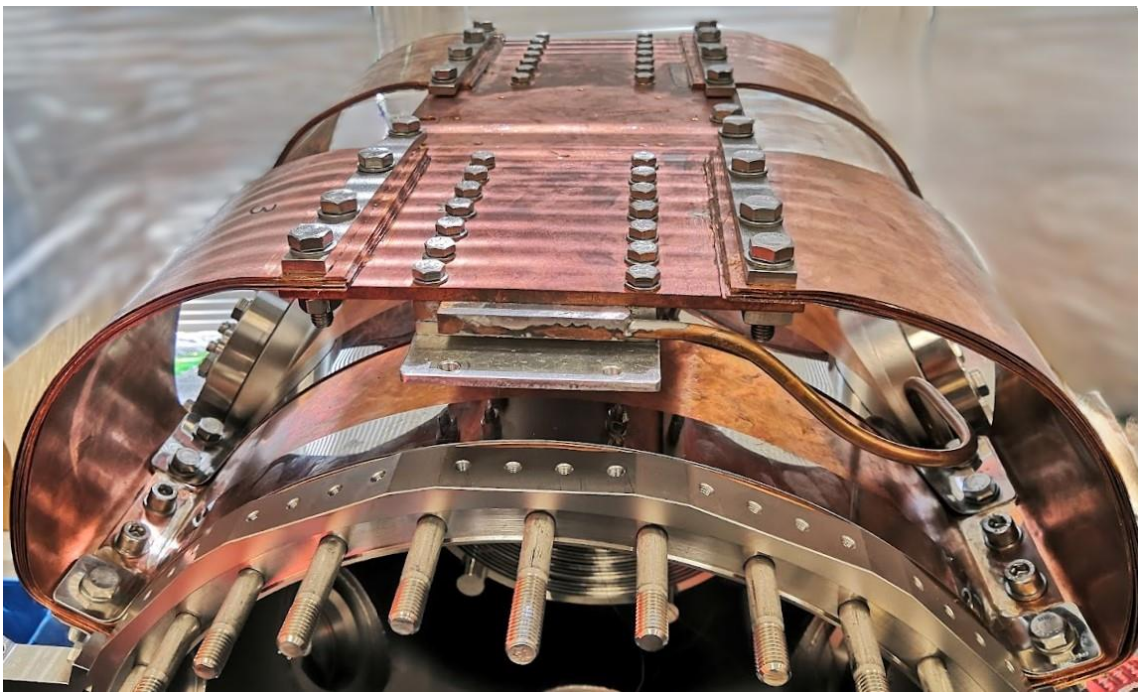


Рис. 4.

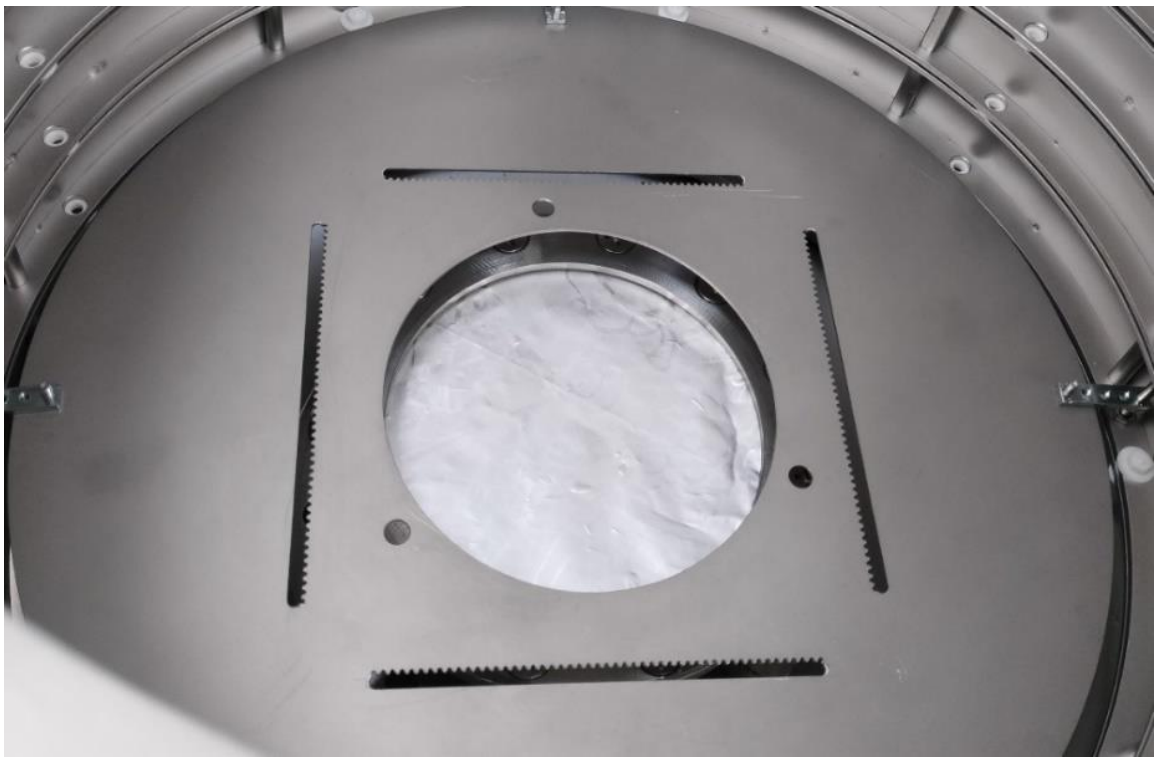


Рис. 5.

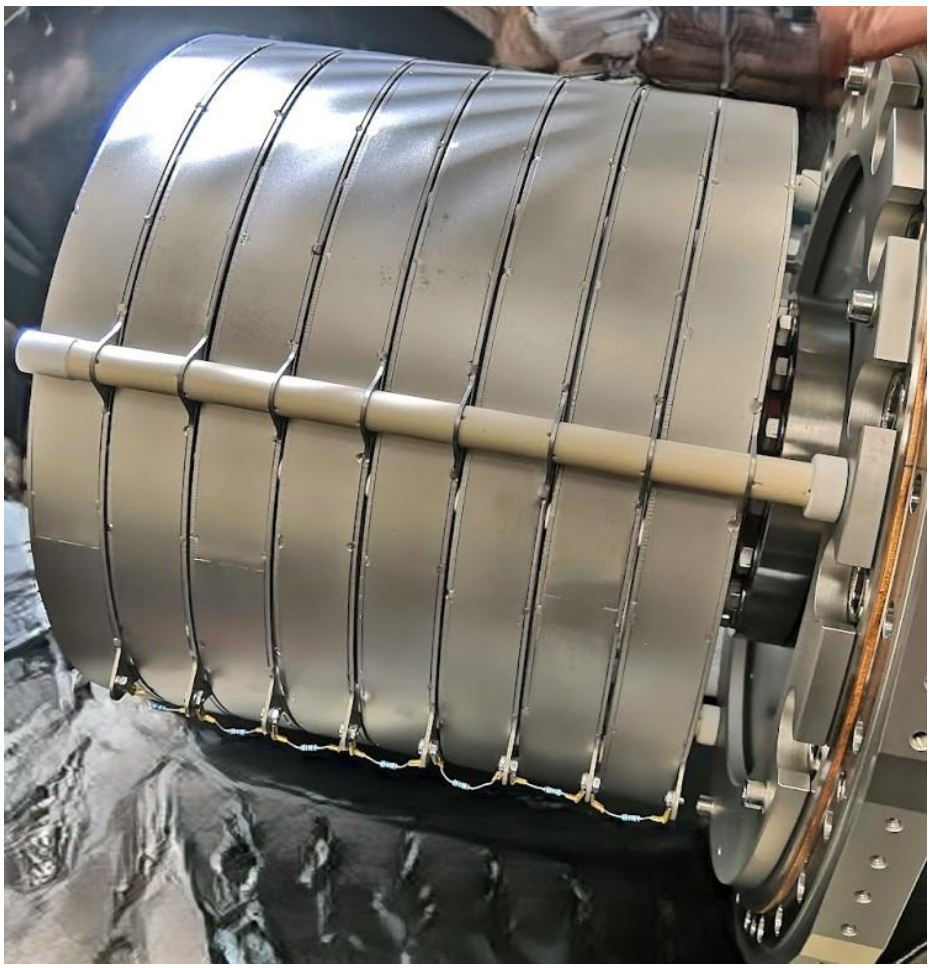


Рис. 6.

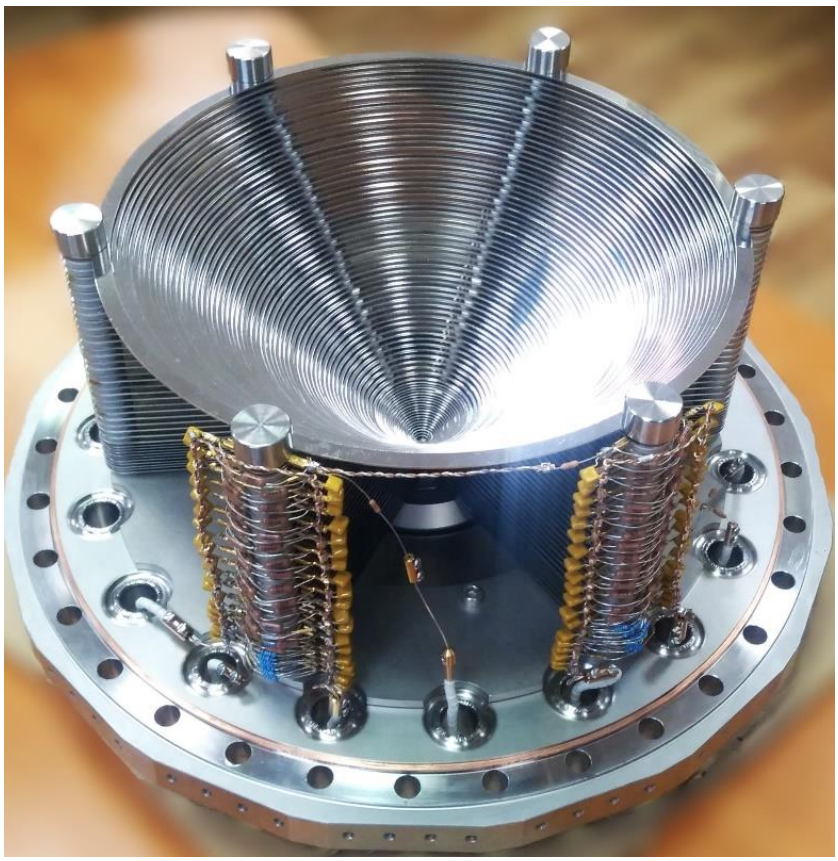


Рис. 7.

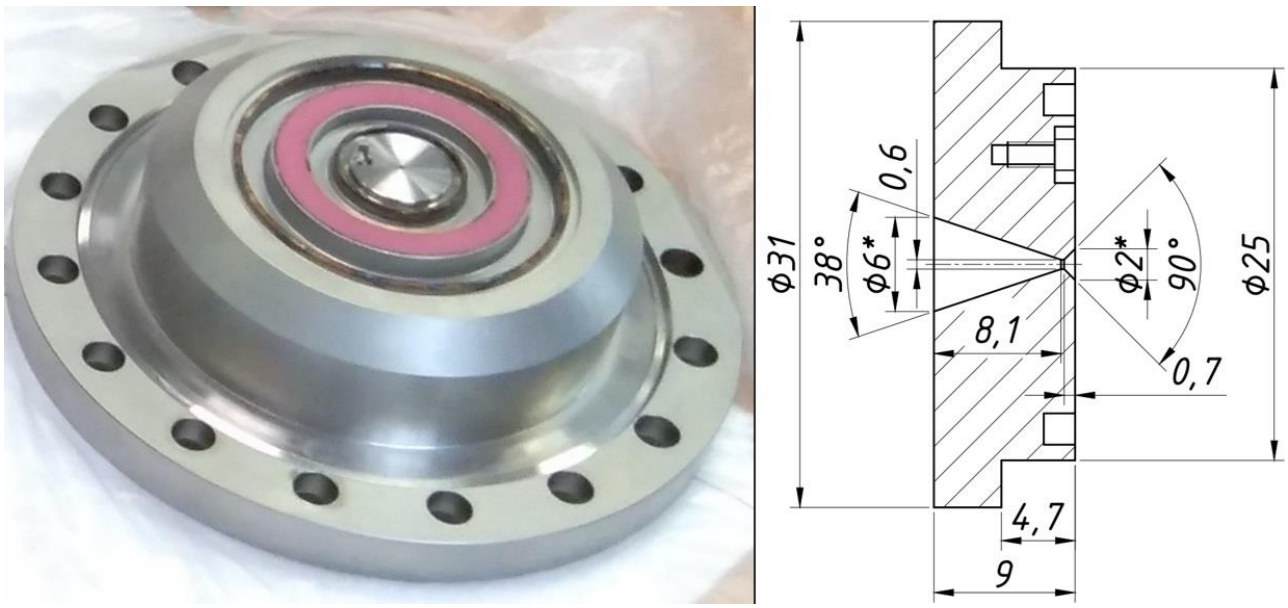


Рис. 8.

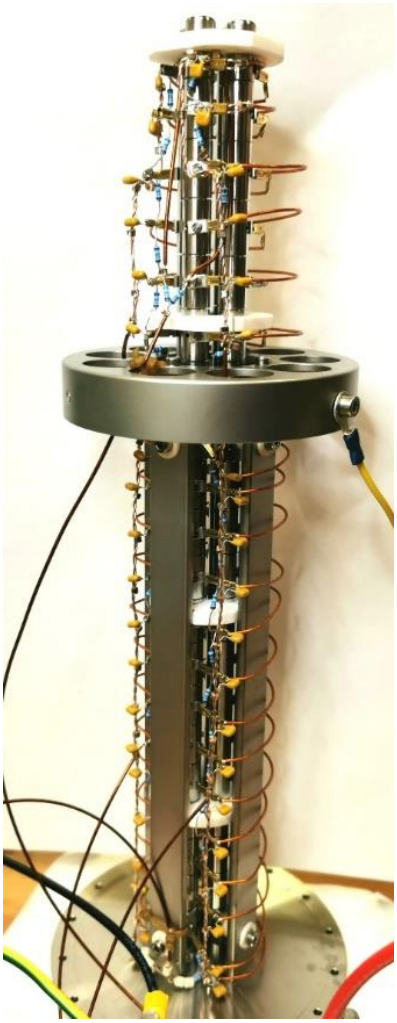


Рис. 9.

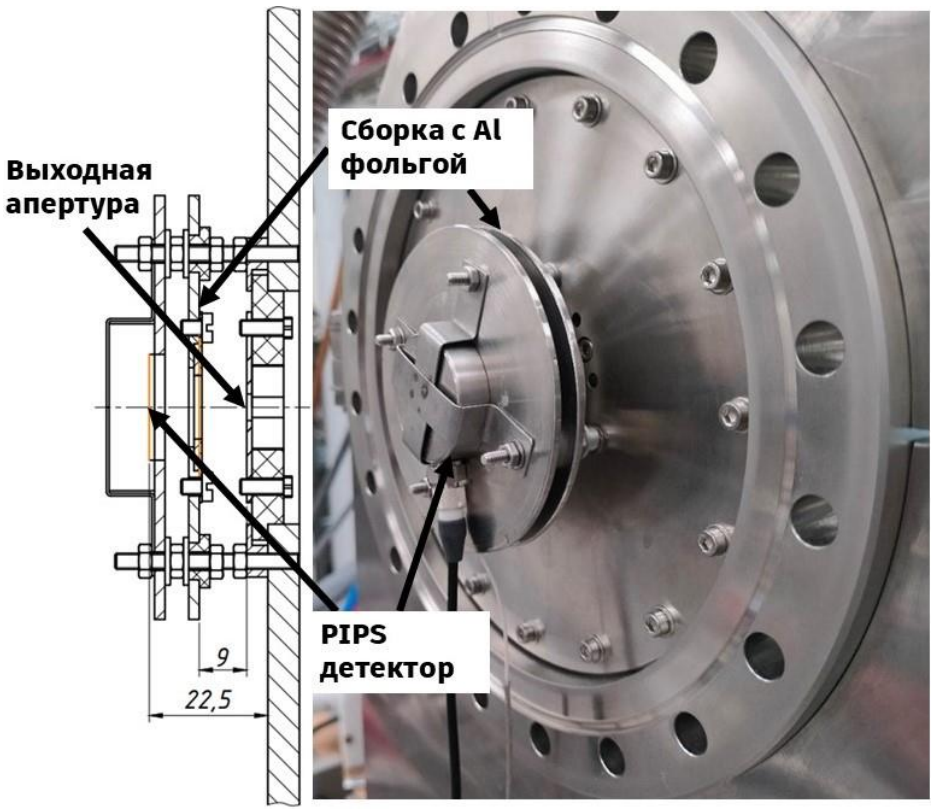


Рис. 10.

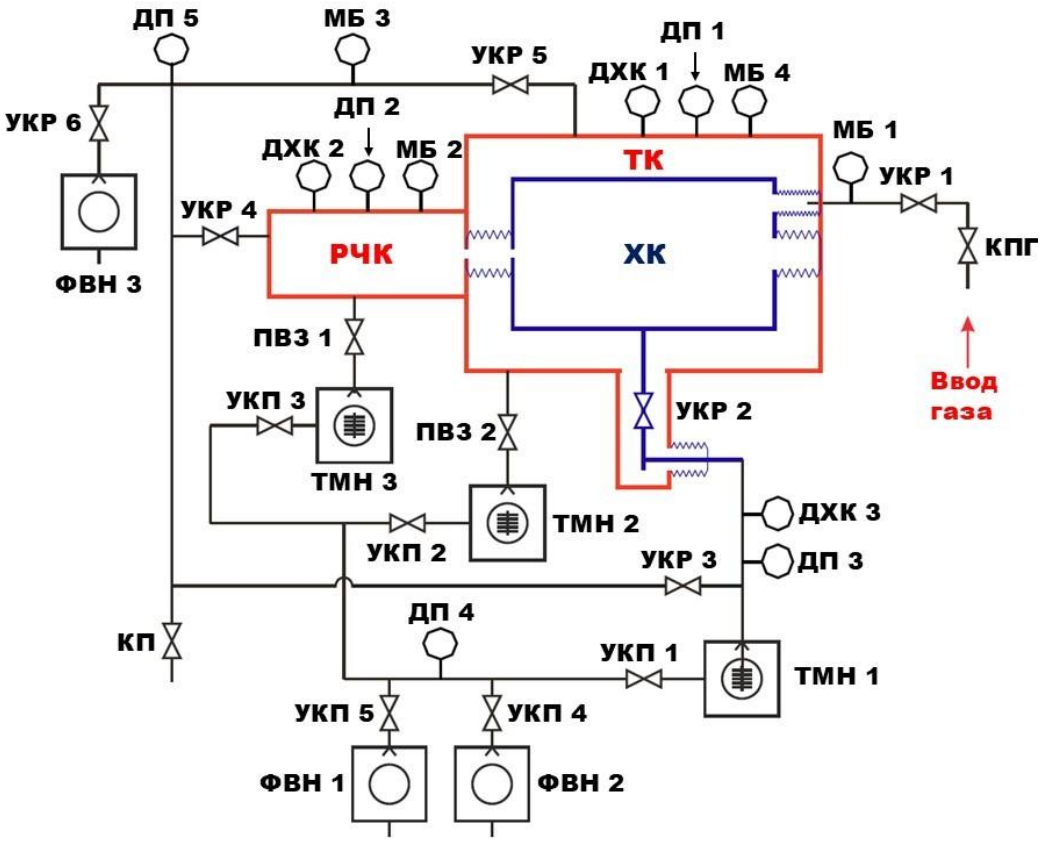

ДП 5
МБ 3
УКР 5
ДП 1
ДХК 1
МБ 4
УКР 6
ДП 2
ДХК 2
МБ 2
ТК
МБ 1
УКР 1
УКР 4
РЧК
ХК
КПГ
ФВН 3
ПВЗ 1
Ввод газа
УКП 3
ПВЗ 2
УКР 2
ТМН 3
ДХК 3
ТМН 2
УКП 2
УКР 3
ДП 3
ДП 4
КП
УКП 1
ТМН 1
УКП 5
УКП 4
ФВН 1
ФВН 2

Рис. 11.

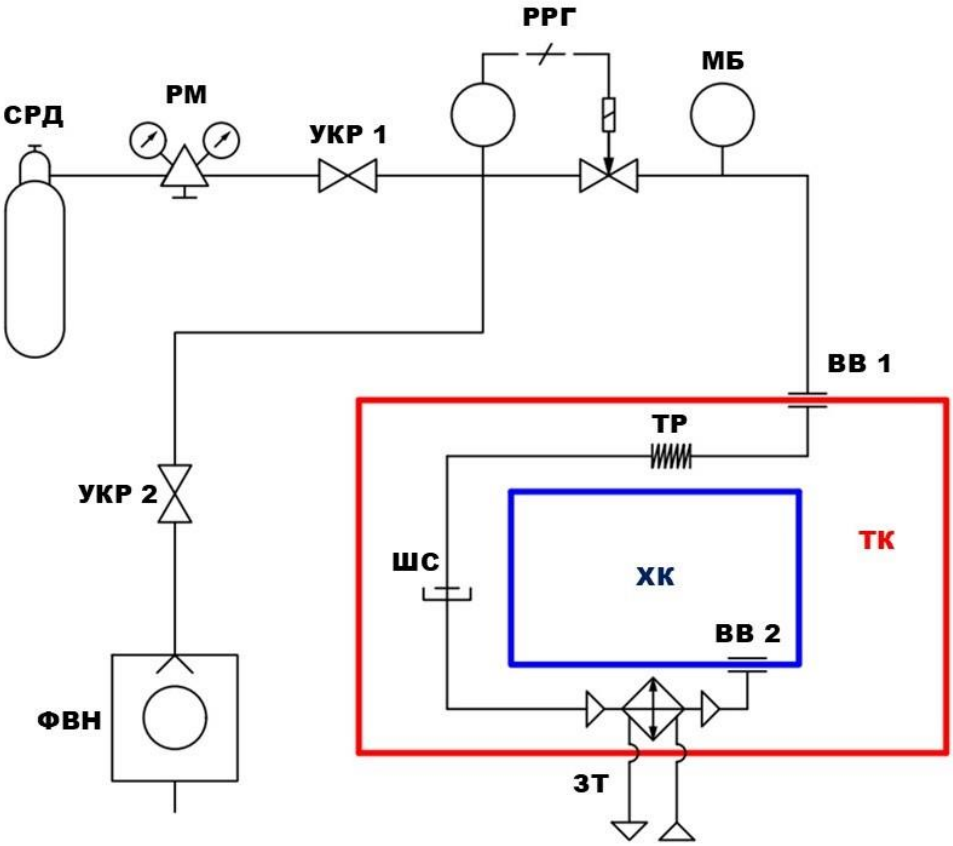


Рис. 12.

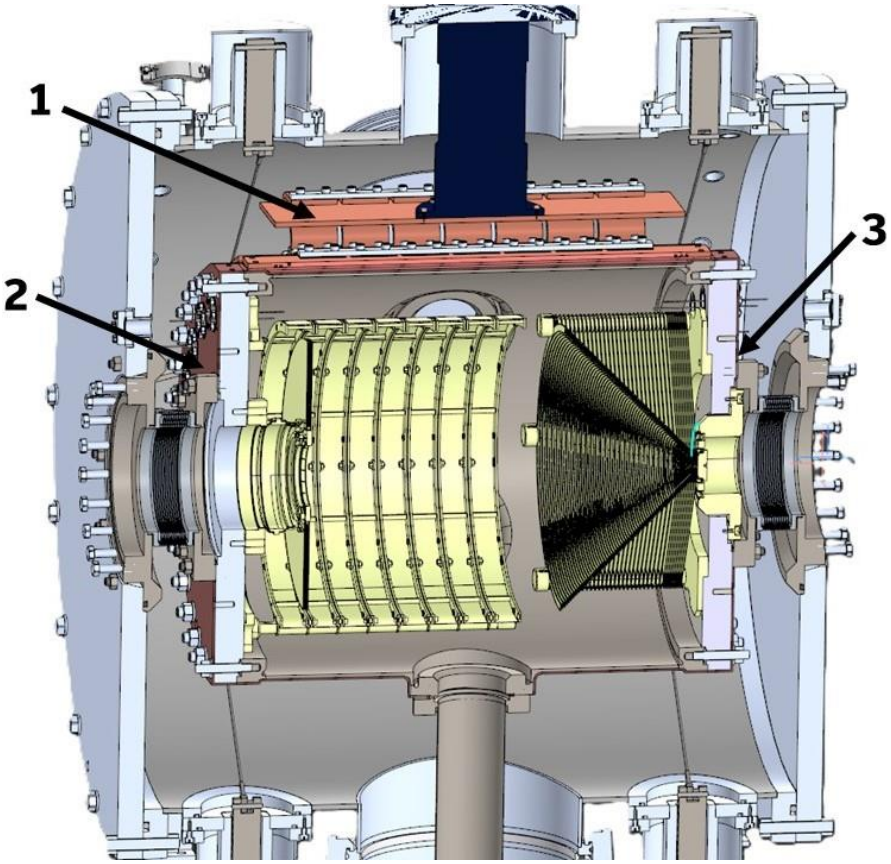


Рис. 13.

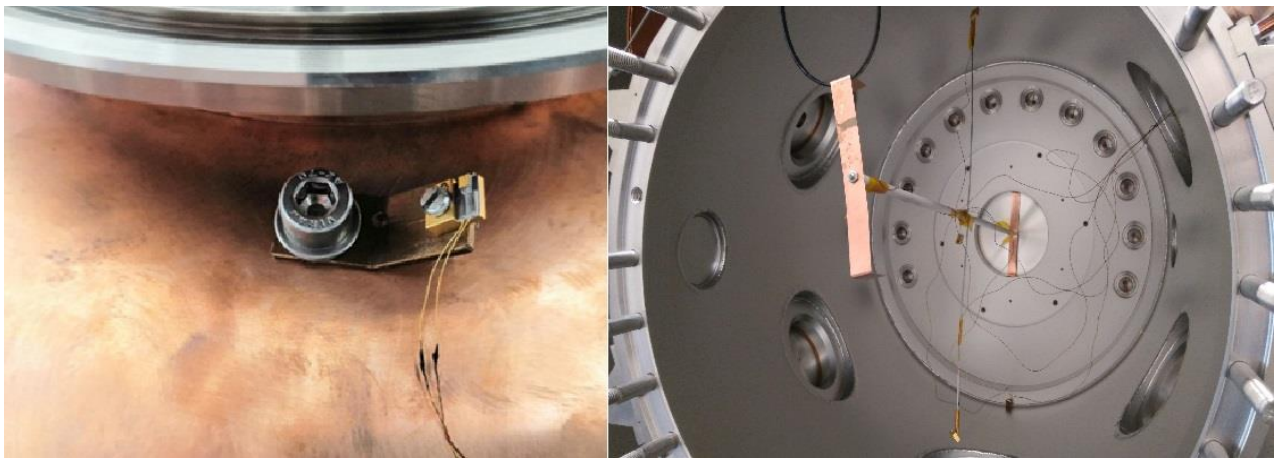


Рис. 14.

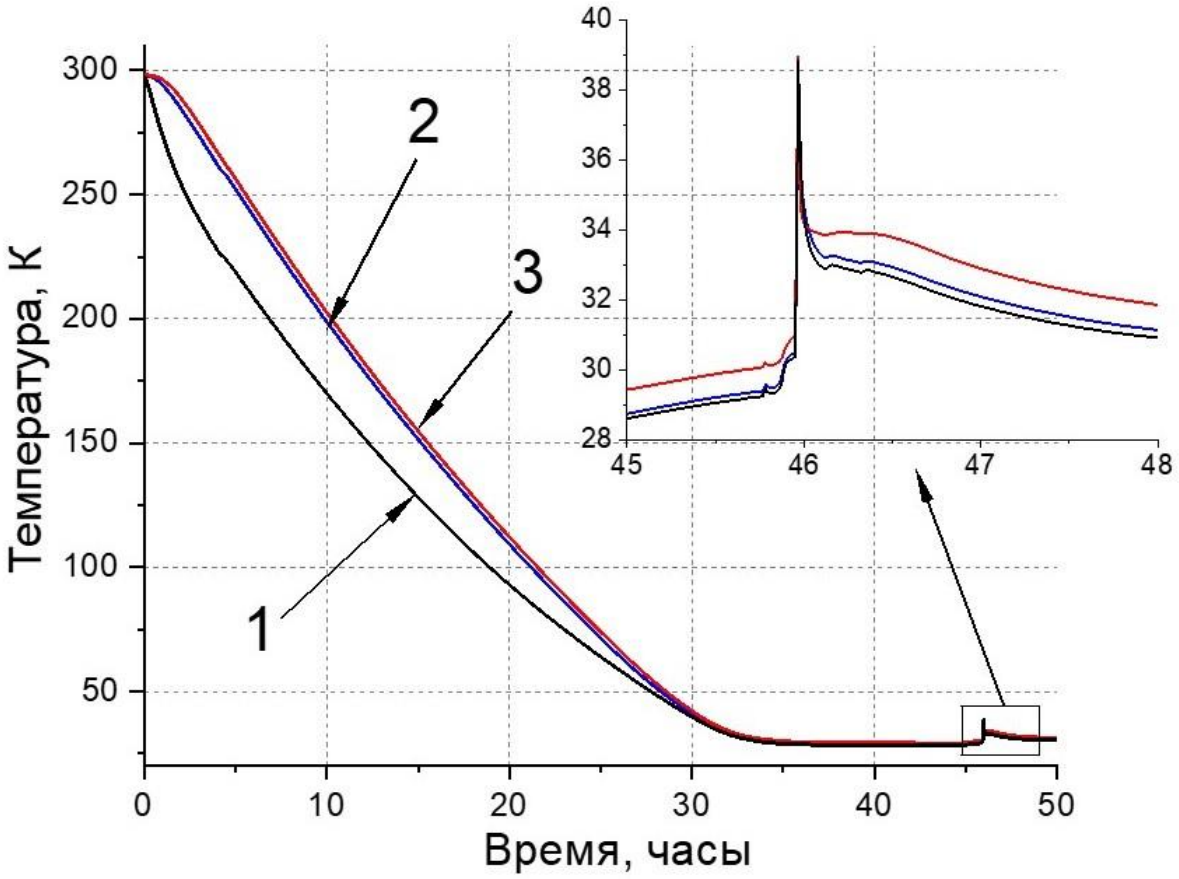

Температура, К
Время, часы
1
2
3
300
250
200
150
100
50
0
10
20
30
40
50
40
38
36
34
32
30
28
45
46
47
48

Рис. 15.

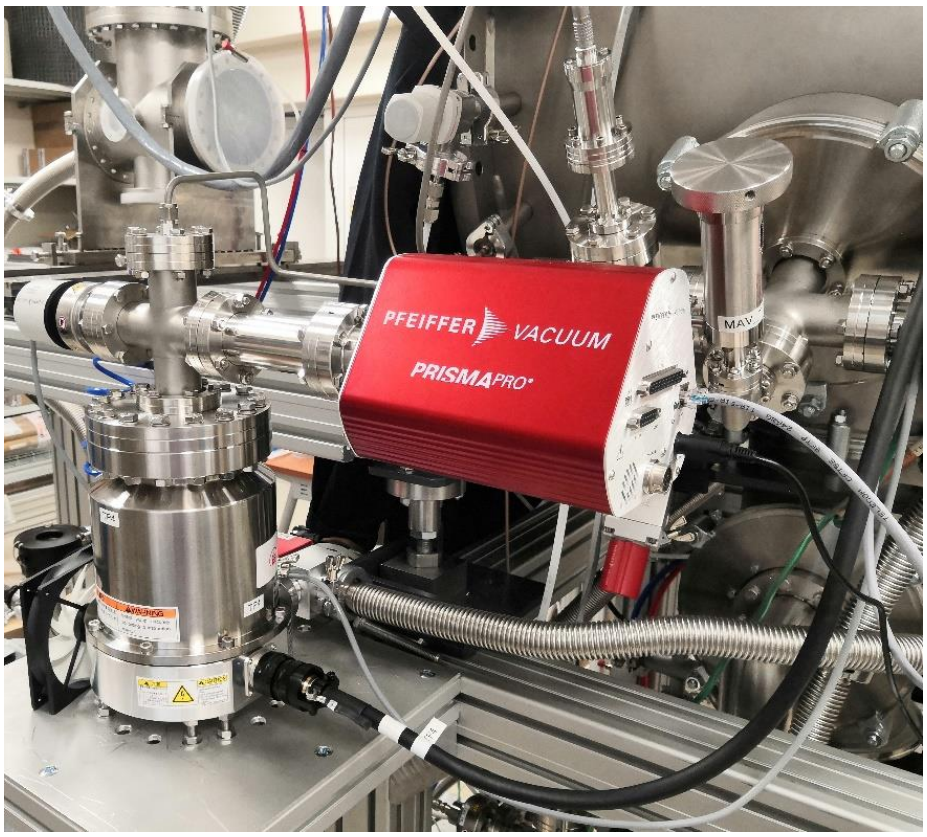


Рис. 16.

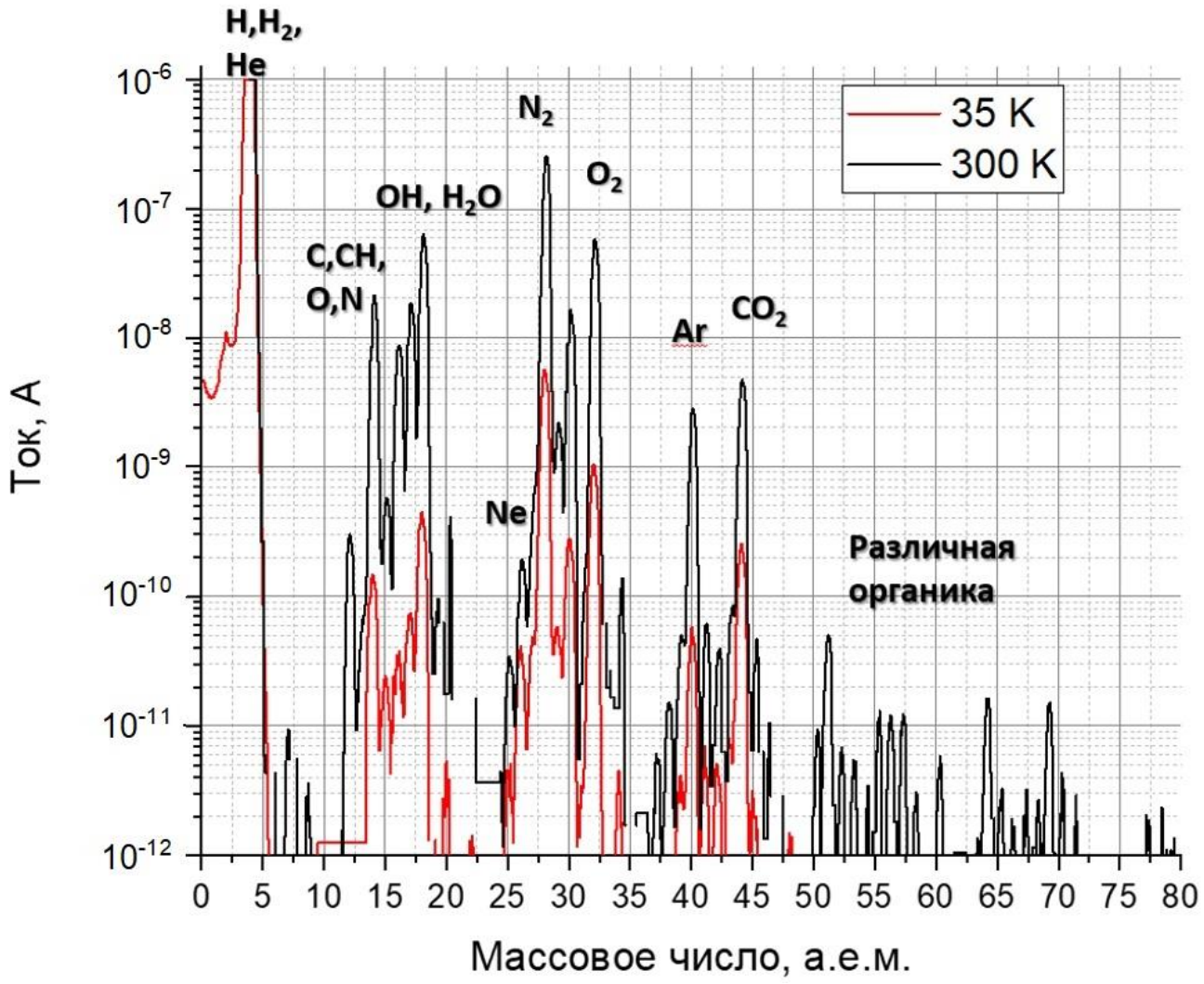

H,H2,
He
N2
O2
OH, H2O
C,CH,
O,N
Ne
Ar
CO2
Различная
органика
35 K
300 K
Ток, А
Массовое число, а.е.м.

Рис. 17.