



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

25-01

P13-2001-25

ТРИТИЕВАЯ МИШЕНЬ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ
НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР
И КОМПЛЕКС ЕЕ ГАЗОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Направлено в оргкомитет международной конференции
«NPBL-2001», Мессина, Италия, 21–24 мая 2001 г.;
в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

2001

А.А.Юхимчук*, В.В.Перевозчиков*, В.А.Апасов*, В.С.Арюткин*,
Ю.И.Виноградов*, М.Д.Вихарев*, Н.С.Ганчук*, А.Н.Голубков*,
С.К.Гришечкин*, А.М.Демин*, С.В.Златоустовский*, Г.И.Карякин*,
В.А.Клиш*, А.А.Кононенко*, А.А.Куколкин*, А.В.Курякин*,
В.Н.Лобанов*, И.Л.Малков*, С.С.Матвеев*, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Родин,
В.Я.Рожков*, В.А.Сафронов*, С.И.Сидорчук, В.М.Солянкин*,
Г.М.Тер-Акопян, В.В.Травкин*, Д.П.Тумкин*, С.В.Фильчагин*

Введение

Изследование структуры экзотических легких ядер и ядерных систем, находящихся на границе нейтронной стабильности, имеет фундаментальное значение и представляет в настоящее время одно из центральных направлений в изучении ядерной структуры (см. обзор [1] и ссылки к нему). Реакции передачи нуклонов с применением пучков радиоактивных ядер предоставляют хорошие возможности для изучения структуры экзотических легких ядер [2,3]. Особенно перспективным для таких исследований является применение тритиевой мишени на пучках радиоактивных ядер.

Абсолютный рекорд в отношении нейтронного избытка принадлежит уникальной системе ${}^8\text{He}+{}^3\text{H}$, где ${}^8\text{He}$ представляет пучок ядер, бомбардирующих ядра тритиевой мишени. В результате реакции передачи двух нейтронов от ядра трития ядру ${}^8\text{He}$ в выходном канале реакции образуются два продукта – ядро ${}^{10}\text{He}$ и протон. Избыток нейтронов во входном канале реакции предопределяет относительно малую затрату энергии на переход от системы ${}^8\text{He}+{}^3\text{H}$ к системе ${}^{10}\text{He}+p$ в выходном канале. Поэтому поперечное сечение этой реакции, а следовательно, и скорость счета регистрируемых продуктов - протонов - будут наибольшими среди других ядерных реакций, приводящих к ядру ${}^{10}\text{He}$. Поперечное сечение реакции ${}^8\text{He}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^{10}\text{He}+p$ и зависимость сечения от угла вылета протонов будут отражать корреляцию нейтронов в ядре ${}^{10}\text{He}$ и степень подобия свободного ядра ${}^8\text{He}$ ядру ${}^{10}\text{He}$.

Аналогичные аргументы могут быть выдвинуты и в отношении реакций ${}^3\text{He}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^5\text{He}+p$, ${}^9\text{Li}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^{11}\text{Li}+p$, ${}^6\text{He}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^8\text{He}+p$ – самых эффективных ядерных реакций с точки зрения получения точных данных о свойствах ядер ${}^5\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^8\text{He}$. Список бомбардирующих ядер можно было бы значительно расширить, включив в него ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{12}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$ и др. Очень эффективными для синтеза и изучения легких нейтроноизбыточных ядер будут реакции передачи протона от бомбардирующих ядер ядрам трития, такие как ${}^8\text{He}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^7\text{He}+{}^4\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^{10}\text{He}+{}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{Be}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^{12}\text{Li}+{}^4\text{He}$ и др. Эти примеры указывают на большие перспективы применений тритиевой мишени на пучках радиоактивных ядер.

Все вышесказанное побудило авторов к созданию тритиевой мишени. Однако, поскольку тритий является радиоактивным веществом, проведение работ с ним требует строгого соблюдения правил и норм радиационной безопасности. Поэтому для работы с тритиевой мишенью был создан комплекс оборудования, позволяющий проводить ее заполнение тритием, эвакуацию и утилизацию трития из мишени, контроль радиационной обстановки как в технологических коммуникациях, так и в помещении, где проводятся работы.

Данный комплекс введен в эксплуатацию на тритиевом пучке сепаратора АКУЛИНА циклотрона У-400М ЛЯР ОИЯИ [4], что позволило, начиная с декабря 2000 г., проводить систематические исследования экзотических нейтроноизбыточных систем.

1. СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

Конструктивно комплекс состоит из четырех функционально взаимосвязанных между собой систем (рис.1):

- мишенного блока (МБ), расположенного во внутренней полости реакционной камеры (РК) сепаратора АКУЛИНА [4] и обеспечивающего радиационно-безопасное хранение трития в процессе эксперимента в жидком или газообразном состоянии при заданной температуре;
- системы наполнения (СН), обеспечивающей подачу в мишень изотопов водорода или гелия и позволяющей многократно использовать один и тот же изотоп при смене газа в мишени;
- системы утилизации трития и контроля радиационной обстановки (СУ) при проведении работ с тритием;

- автоматизированной системы контроля и управления (СКУ), обеспечивающей контроль состояния элементов комплекса, автоматическое поддержание рабочих параметров, ведение протокола эксперимента, графическое и цифровое отображение контролируемых процессов.

2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОМПЛЕКСА

Принципиальная схема комплекса представлена на рис. 1, общий вид комплекса, установленного на сепараторе АКУЛИНА, - на рис. 2. Основное внимание при создании комплекса было уделено обеспечению норм радиационной безопасности при работе с тритием, что и предопределило структуру и конструктивное исполнение элементов комплекса.

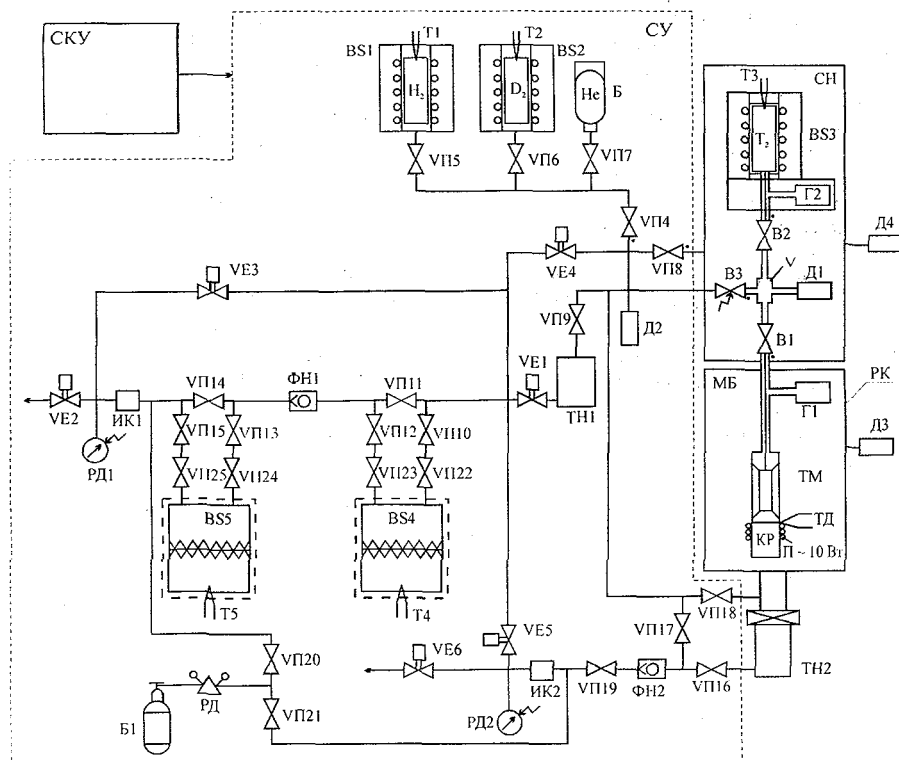


Рис.1. Принципиальная схема комплекса: СКУ – система контроля управления; СН – система наполнения; СУ – системы утилизации трития и контроля радиационной обстановки; МБ – мишенный блок; ТМ – тритиевая мишень; РК – реакционная камера; BS1(2) – источник протия (дейтерия); BS3 – источник трития; BS4(5) – ловушка; Б(Б1) – баллон с гелием; Д1(4) – измеритель вакуума (PRK261); Д2 – датчик давления (TRK261); Д3 – датчик давления (CMR261); ИК1(2) – ионизационная камера; РД1(2) – электроконтактный мановакуумметр (ДА2005); ФН1(2) – насос форвакуумный (BOC EDWARDS GVSP30); ТН1(2) – насос турбомолекулярный (STP – 300M); В1-3, VP4-21 – вентили; VP22-25 – вентили сильфонные вакуумные; VE1-6 – вентили электромагнитные; V – мерная емкость; Т1-Т5 – термопара; Г1(2) – геттер; ТД – термодиод; КР – криорефрижератор GOOL POWER 2/10

Основным элементом комплекса является тритиевая мишень (ТМ), которая входит в состав МБ и представляет собой сосуд с тонкостенными (12,5 мкм) окнами и двумя рубежами защиты. Заполнение мишени тритием осуществляется в РК, которая является третьим рубежом защиты на пути несанкционированного проникновения трития в окружающую среду.

Хранение трития активностью 1кКи и его транспортировка осуществляются в химически связанном состоянии на ^{238}U в источнике BS3, входящем в состав СН. Равновесное давление для тригида урана при комнатных температурах составляет не более 10^{-3} Па, а температура его разложения, при которой равновесное давление становится выше атмосферного, более чем 650 К. Конструкции источника BS3 и СН, обеспечивающие три рубежа защиты, в совокупности со свойствами тритида урана позволяют классифицировать источник BS3 как закрытый источник ионизирующего излучения.

В собранном виде ТМ и источник трития BS3 представляют собой замкнутую систему, которая позволяет удерживать тритий в жидком или газообразном виде в процессе проведения эксперимента либо переводить его в химически связанное состояние для длительного хранения в источнике.

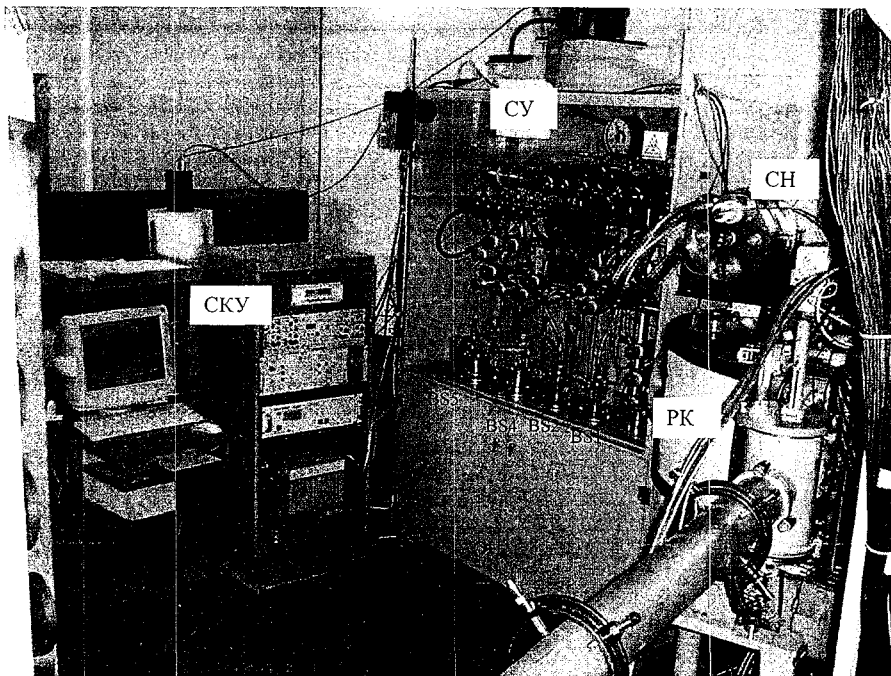


Рис.2. Общий вид комплекса: СКУ - автоматизированная система контроля и управления; СУ - система утилизации и контроля радиационной обстановки; СН - система наполнения; РК - реакционная камера

Однако существует ряд технологических операций, нарушающих замкнутость этой системы. К ним относятся:

- перезаполнение мишени тритием, дейтерием, ^3He либо ^4He , требующееся по условиям физического эксперимента;
- удаление из мишени радиогенного гелия, образовавшегося в результате распада трития в процессе длительной работы;
- разгерметизация газовых коммуникаций при смене мишени или ее демонтаже.

Перед проведением всех этих операций требуется тщательная очистка газовых коммуникаций, контактировавших с тритием. Очистка обеспечивается путем проведения многократных процессов «промывки», т.е. заполнения газовых коммуникаций нерадиоактивными изотопами водорода с последующим их удалением с помощью системы утилизации, в которой происходит химическое связывание изотопов водорода металлгидридными системами. При этом в газовых коммуникациях происходит изотопный обмен между адсорбированным поверхностью тритием и нерадиоактивным изотопом водорода. «Промывки» завершаются при достижении в эвакуируемом газе концентрации трития, не превышающей 10^{-6} Ки/л.

2.1. Тритиевая мишень

Схематично мишень изображена на рис.3. Она представляет собой цилиндрическую полость Е, образуемую поверхностью А корпуса К и двумя мембранами М1. Подача исследуемого газа в эту полость осуществляется по трубке Т1 из системы наполнения. С целью обеспечения радиационной безопасности в устройстве мишени предусмотрен дополнительный рубезж защиты от возможного проникновения трития во внутреннюю полость реакционной камеры. Он состоит из двух полостей Б, образуемых корпусом К и мембранами М2, внутренней полости трубки Т2, герметично закрепленной к указанному корпусу и трубке Т1, а также внутренней полости В обечайки Д, служащей для размещения геттера Г. Внутренние объемы полостей Б и трубки Т2 соединены между собой магистральями из трубок Т3. Полость В с внутренней полостью трубки Т2 соединена трубкой Т4. В случае нарушения герметичности мембран М1 или трубки Т1 тритий из полости Е поступит в объем второго рубезжа и будет полностью поглощен геттером Г. В качестве материала геттера используется порошкообразный Тi, подготовленный по специальной технологии. Равновесное давление трития над активированным титаном при комнатных температурах составляет не более 10^{-8} Па. Данное техническое решение позволяет предотвратить попадание трития в окружающую среду при любых нарушениях герметичности в первом рубезже защиты мишени. Количество Тi в геттере выбрано из условия возможности обеспечения полного поглощения газа, находящегося в коммуникациях мишени, СН и в источнике BS3 (рис.1). Мишень имеет два варианта исполнения. В первом исследуемый изотоп водорода в полости Е (рис.3) находится в жидкой фазе, во втором – в газовой. Конструкция мишеней одинакова. Различие заключается лишь в расстоянии Ж между мембранами М1 (для «жидкого» варианта – 0,4 мм; для «газового» - 4 мм). Все корпусные элементы мишени, за исключением мембран, выполнены из стали 12Х18Н10Т. Мембраны изготовлены из фольги AISI 316 («Goodfellow», Великобритания) толщиной 12,5 мкм.

Согласно расчетам давление разрушения мембран М1 в случае подачи на них нагрузки со стороны полости Е составляет ~ 2 МПа. Испытания на несущую способность, проведенные на двух макетах мишеней в нормальных температурных условиях, показали, что давление разрушения соответствует расчетному значению и составляет 2 и 2,2 МПа. В реальных же условиях эксплуатации давление газа в полости Е должно быть не более 0,1 МПа.

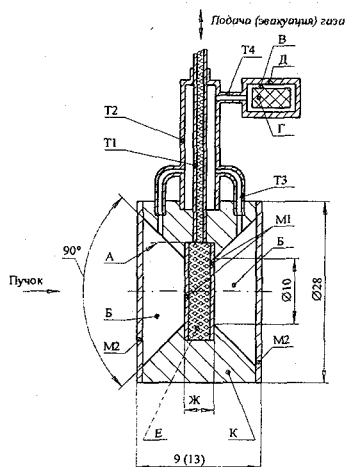


Рис.3. Схематическое изображение мишени: К - корпус; М1, М2 - мембраны; Т1-Т4 - трубки; Е, Б, В - полости; Д - обечайка; Г - геттер

2.2. Хранение изотопов водорода и заполнение мишени

Хранение изотопов водорода осуществляется на ^{238}U в химически связанном состоянии. Для хранения протия и дейтерия используются источники BS1 и BS2, соответственно (рис.1). Источники содержат по 50 г ^{238}U и могут генерировать до 7 нормальных литров газа. Тритий хранится на источнике BS3 с сорбционной емкостью 380 см³.

Конструктивно все источники выполнены в виде цилиндрических ампул с наружным электрическим нагревателем. Отличительной особенностью источника BS3 является то, что его корпус выполнен по принципу автоскрепленного сосуда с вакуумируемым водородным барьером [5,6]. Вакуумирование водородного барьера осуществляется с помощью автономного титанового геттера Г2.

Источники BS1 и BS2 размещены в вытяжном шкафу СУ (рис.2), а источник BS3 - в выносном герметичном корпусе СН, размещенной непосредственно на реакционной камере. Такая компоновка вызвана необходимостью сокращения газовых коммуникаций между мишенью и системой наполнения. Трубопроводы, соединяющие систему наполнения с системой утилизации и реакционной камерой, имеют два рубежа защиты и выполнены по принципу «труба в трубе». При этом внутренний объем наружных труб соединен с вакуумными коммуникациями системы утилизации и реакционной камеры.

Заполнение мишени изотопами водорода осуществляется следующим образом. Соответствующий источник соединяется с предварительно отвакуумированным измерительным объемом V системы наполнения и мишени (рис.1) и производится его нагрев до температуры, обеспечивающей необходимое давление заданного изотопа водорода. Зависимости равновесного давления изотопов водорода над гидридом урана от температуры имеют вид $\log P(\text{Па}) = -4590/T + 11,59$; $\log P(\text{Па}) = -4500/T + 11,56$ и $\log P(\text{Па}) = -4471/T + 11,73$ соответственно для протия, дейтерия и трития [7].

Из этих данных следует, что для заполнения мишени газом под давлением $\approx 0,1$ МПа достаточен нагрев источников до температуры 680+705 К, а в процессе хранения при комнатной температуре давление трития составляет $\approx 7 \cdot 10^{-4}$ Па.

После завершения процесса заполнения отключается нагрев соответствующего источника. При охлаждении источников происходит обратное поглощение выделенного газа из соответствующих газовых коммуникаций. Это позволяет, с одной стороны, многократно использовать один и тот же газ, а с другой, что является более существенным, максимально уменьшить количество трития, уходящего в систему утилизации.

2.3. Охлаждение мишени

Для достижения высокой точности регистрации спектров заряженных частиц – продуктов ядерных реакций, в частности протона, необходимо с высокой точностью знать значение угла между направлением движения бомбардирующего ядра и родившейся заряженной частицы. Это обстоятельство требует создания как можно более тонких мишеней с высокой плотностью и равномерностью распределения ядер по объему мишени. Для реализации этих требований было создано две мишени: «жидкая» и «газовая». Рабочая температура мишеней зависит от давления и используемого изотопа водорода и лежит в диапазоне: для «жидкой» – 18-21 К, для «газовой» – 23-30 К. При работе с изотопами гелия диапазон рабочих температур – 10-13 К (определяется хладопроизводительностью криорефрижератора).

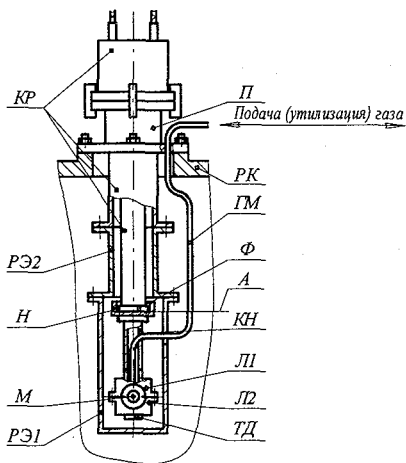


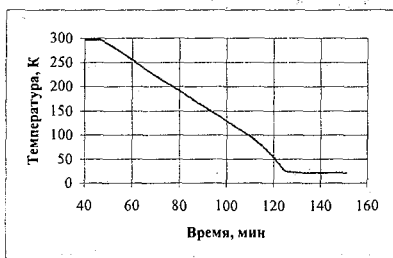
Рис. 4. Схема системы охлаждения: КР – криорефрижератор Cool Power 2/10 (Leybold); П – переходник; РК – реакционная камера; Н – нагреватель; Л1, Л2 – ложементы; РЭ1, РЭ2 – радиационные экраны; М – мишень; ТД – термодиод; КН – кронштейн; ГМ – газовая магистраль

Система охлаждения схематично показана на рис.4. Основным функциональным элементом этой системы является криорефрижератор (КР), герметично установленный на корпусе РК с применением переходника (П). В устройстве криорефрижератора имеется вывод, оформленный в виде стержня с фланцем (Ф) и расположенный во внутренней полости реакционной камеры. На поверхность А фланца установлен нагреватель (Н), позволяющий регулировать температурный режим охлаждения мишени. Через корпус нагревателя холод передается по кронштейну (КН) к ложементу (Л1). В корпусах ложементов Л1 и Л2 выполнены посадочные гнезда, обеспечивающие фиксацию мишени. Описанные элементы системы охлаждения заключены в радиационные тепловые экраны РЭ1 и РЭ2. Корпуса этих экранов, кронштейн и ложементы выполнены из меди и покрыты

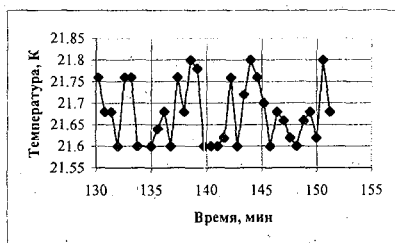
никелем. Для улучшения условий теплопередачи соединение разъемных элементов системы осуществляется через индиевые прокладки.

Процесс охлаждения (сжижения) газа в мишени происходит в следующей последовательности. Внутренняя полость реакционной камеры вакуумируется до давления 10^{-3} - 10^{-4} Па. Система наполняется, предварительно заполненная рабочим газом, через газовую магистраль (ГМ) соединяется с внутренним объемом мишени. Затем включается криорефрижератор и начинается процесс охлаждения. Динамика процесса охлаждения контролируется по показаниям термодиода (ТД), закрепленного к корпусу ложеента Л2.

При определении температуры газа во внутренней полости мишени принято допущение, что при установившемся статическом режиме температура газа с большой точностью равняется температуре корпуса ложеента. Характерный вид кривой охлаждения для мишени в «жидком» варианте приведен на рис. 5,а. Из него видно, что процесс охлаждения газа в мишени до жидкой фазы ($T \sim 21$ К) занимает 70 мин. После достижения требуемой температуры газа в мишени система охлаждения переводится в режим термостабилизации, обеспечиваемый регулированием электрических параметров нагревателя. Указанная система обеспечивает поддержание достигнутой эксплуатационной температуры с точностью не хуже $\pm 0,1$ К в течение всего эксперимента. Характерный график температуры в эксплуатационном временном интервале приведен на рис. 5,б.



а



б

Рис.5. Характерный вид кривой а) охлаждения мишени и б) поддержания температуры

После завершения сеанса включается нагреватель, мишень отепляется и газ удаляется в систему наполнения. Время отепления мишени ~ 20 мин.

2.4. Утилизация трития

Утилизация изотопов водорода осуществляется в основном путем «посадки» целевого изотопа на соответствующий источник. Однако в ряде случаев (см. п.2.2) требуется проведение «промывки» и вакуумирования газовых коммуникаций, контактировавших с тритием. В этом случае утилизация осуществляется абсорбированием изотопов водорода ловушками BS4 и BS5.

В системе утилизации газа применены ловушки двух типов – на основе Ti и на основе интерметаллидного соединения $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$. Ловушки на основе Ti характеризуются высокой удельной емкостью по водороду и низкими равновесными давлениями водорода над гидридом. Они эффективны в случае утилизации чистых изотопов водорода. Однако наличие таких примесей в газе, как O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 и др., снижает сорбционную емкость титана и скорость поглощения им водорода. Поэтому в системе утилизации последовательно с титановыми применены ловушки с интерметаллидом $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$, который обладает меньшей сорбционной емкостью, но значительно менее чувствителен к примесям [8]. Ловушка BS4 содержит 300 г сплава $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$, а ловушка BS5 – 250 г титана. Рабочая температура ловушек составляет 200 ± 250 °С. Такая температура

обеспечивает высокие скорости поглощения водорода, а равновесные давления изотопов водорода над соответствующими гидридами еще достаточно низкие. Это позволяет добиться практически полного поглощения изотопов водорода ловушкой. На рис. 6 приведены равновесные давления водорода над гидридами титана (а) [9] и интерметаллида $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$ (б) при температурах 200 и 250 °С.

Как видно из рис.6, в области рабочих температур 200÷250 °С поглощение водорода титаном до давления не выше $1 \cdot 10^{-2}$ Па происходит при его заполнении до емкости ≈ 350 см³/г. Таким образом, титановая ловушка может поглотить ≈ 87 л газа, т.е. весь газ из установки. Удельная емкость интерметаллида $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$ ниже и при поглощении газа до давления $\approx 1 \cdot 10^{-1}$ Па составляет $\approx 50 \div 70$ см³/г. Этого достаточно, чтобы с двух-, трехкратным запасом поглотить весь тритий из установки, в случае если из-за наличия примесей он будет плохо поглощаться ловушкой на основе титана.

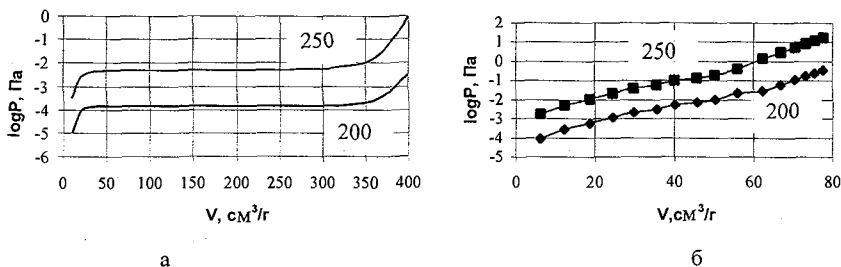


Рис.6 Равновесные давления водорода над гидридом Ti (а) и интерметаллидом $Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})$ (б) при температурах 200 и 250 °С

Ловушка BS4 может работать в режиме гидридного насоса-геттера либо в «прокачном». В последнем случае эвакуируемый газ, содержащий изотопы водорода, прокачивается через ловушку BS4 с помощью безмасляного форвакуумного насоса (ФН1) (рис.1). В ловушке изотопы водорода поглощаются интерметаллидом, однако различные примеси, содержащие следы трития, все же могут проходить через ловушку. При этом они фиксируются ионизационной камерой ИК1. Если показания ИК1 превышают допустимые нормы, то газовый поток направляется на ловушку BS5 для дополнительной очистки. Если даже после этого показания ИК1 превышают допустимые пределы, то происходит автоматическая блокировка вентиля ВЭ2, открывается вентиль ВЭ3 и установка утилизации переводится в режим рециклинга. При этом газовая смесь прокачивается через обе ловушки до тех пор, пока показания ИК1 не станут ниже допустимых норм.

2.5. Контроль и управление комплексом

СКУ комплекса представляет собой распределенную сеть, состоящую из двух компьютеров и набора автономных сетевых модулей, связанных между собой по интерфейсу RS-232 и RS-485. На рис.7 показана сетевая структура СКУ, обозначены устройства и линии сетевой связи между ними с указанием типа связи и скорости передачи.

В сеть включены разнотипные устройства с разными скоростями передачи, и микропроцессорный контроллер I-7188 используется в качестве интеллектуального, адресуемого преобразователя интерфейса. К портам контроллера COM1, COM2, COM3 подключаются модули серии I-7000, контроллер TPG-256 и контроллеры радиационной обстановки KPO_1, KPO_2. Порт COM4 обеспечивает подключение к стандартному последовательному порту центрального управляющего компьютера PC_1.

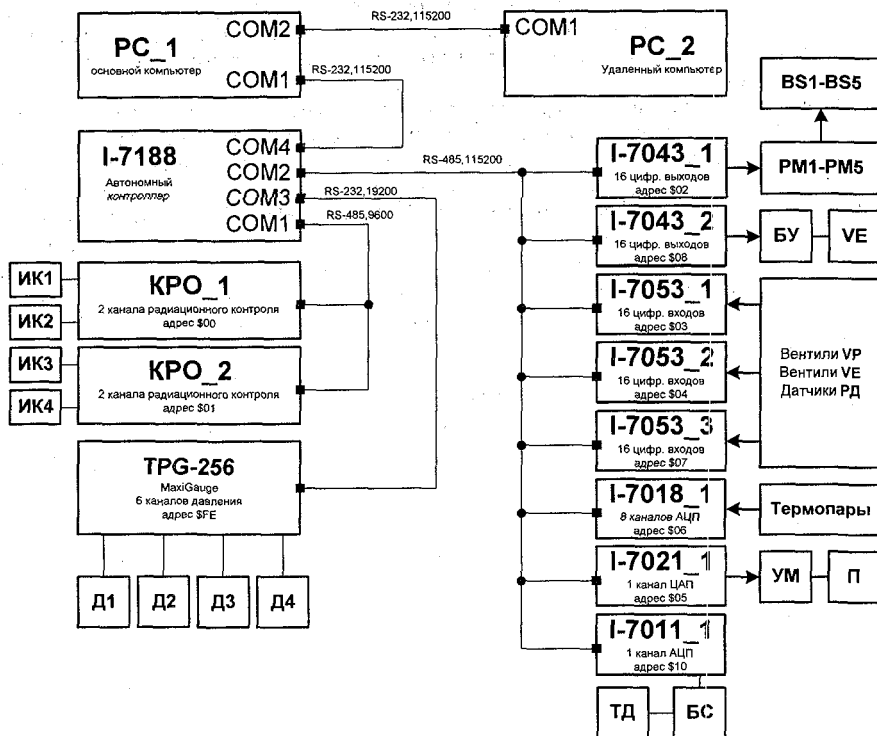


Рис. 7. Схема сетевой структуры СКУ

Этот компьютер служит для сбора данных и активного управления комплексом. Все регистрируемые параметры через второй последовательный порт компьютера PC_1 по сети RS-232 передаются на удаленный компьютер PC_2, расположенный в пультной циклотрона. Этот компьютер обеспечивает прием всех регистрируемых параметров от PC_1 и отображает состояние комплекса.

СКУ включает 5 каналов автоматизированного управления нагревателями источников изотопов водорода BS1-BS3 и ловушек BS4-BS5. Температура нагрева измеряется термопарами, термо-э.д.с. регистрируется модулями многоканального аналогового ввода типа I-7018 с точностью 0,05%. Мощность регулируется полупроводниковыми электронными блоками (PM) методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с периодом 2-5 секунд. Модулирующий сигнал формируется компьютером и подается на блоки управления через многоканальные модули дискретного ввода-вывода типа I-7043. Температура при этом стабилизируется с точностью около 1-2 °С. При превышении предельных значений этих параметров автоматически отключается питание нагревателей этих узлов.

Вакуум измеряется датчиками Д1-Д4 фирмы „Balzers“ через 6-канальный контроллер TPG-256, включенный в локальную сеть СКУ двухпроводной линией связи по интерфейсу RS-485.

СКУ комплекса обеспечивает контроль за состоянием вентилях VP; контроль и управление состоянием электромагнитных клапанов VE1-VE6 (через блок управления

(БУ)); контроль состояний концевых выключателей мановакууметров РД1, РД2; блокировку выброса газа в вентиляцию при превышении заданного уровня удельной объемной активности газа и выполняет ряд других функций, обеспечивающих безопасность проведения работ.

Температура мишени измеряется кремниевым диодом, подключенным через электронный блок согласования (БС), включающий стабилизатор тока на 10 мкА и буферный дифференциальный усилитель с входным сопротивлением 100 МОм и коэффициентом передачи, равным 1. Напряжение на выходе усилителя измеряется одноканальным модулем аналогового ввода I-7011 с точностью 0,05%. Диапазон измерений 1,4÷330 К, точность измерения в диапазоне 2÷100 К составляет $\pm 0,1$ К, а в диапазоне выше 100 К - ± 1 % от измеряемой температуры. Для регулирования и стабилизации температуры мишени используется нагреватель с максимальной мощностью 20 Вт. Управление мощностью осуществляется одноканальным модулем аналогового вывода I-7021 через усилитель (УМ).

СКУ включает подсистему дозиметрического контроля по тритию. Подсистема обеспечивает мониторинг объемной активности трития в газовой системе установки (ионизационные камеры ИК1 и ИК2) и контроль объемной активности трития в воздухе рабочей зоны (камеры ИК3, ИК4). В качестве блоков преобразования для ионизационных камер используются промышленные преобразователи БПН-16П. Управление блоками преобразования и сбор данных осуществляются двумя контроллерами радиационной обстановки (КРО). В системе предусмотрено звуковое предупреждение персонала при превышении заданных порогов объемной активности.

Заключение

С использованием данного комплекса и тритиевых мишеней на сепараторе АКУЛИНА, работающем на пучке циклотрона У-400М, проведена серия экспериментов, где тяжелые изотопы водорода ^4H и ^5H синтезировались в реакциях передачи нейтронов $t+t \rightarrow p+^5\text{H}$, $t+t \rightarrow d+^4\text{H}$, $t+d \rightarrow p+^4\text{H}$ и исследовались другие каналы реакций $t+d$ и $t+t$ при энергии бомбардирующих ионов трития 56,5 МэВ. Интенсивность пучка тритонов на мишени достигала 10^8 с^{-1} . Пучок был сфокусирован на мишень в пятно диаметром менее 5 мм. Тритиевая мишень и комплекс ее газового обеспечения работали надежно, превышение фона по объемному содержанию трития в рабочей зоне и вытяжной вентиляции не зафиксировано.

Толщина окон мишени 12,5 мкм вполне приемлема при изучении указанных реакций в расчете на регистрацию продуктов, вылетающих в переднюю полусферу в диапазоне углов от 0 до 40° в лабораторной системе. При более высокой энергии пучка тритонов ($E > 80$ МэВ) эта мишень может быть использована и для изучения реакции $t+t \rightarrow p+^5\text{H}$ с вылетом протонов в заднюю полусферу, $170-150^\circ$, имеющим место при передаче двух нейтронов от ядер мишени на бомбардирующие ядра трития. С точки зрения кинематики такая реакция подобна реакции $^6\text{He}+t \rightarrow ^{10}\text{H}+p$, упоминавшейся во введении.

Вместе с тем перспективным является создание тритиевой мишени с толщиной окон 5 мкм из нержавеющей стали, что значительно увеличит возможности проведения подобных экспериментов.

Авторы благодарят О.В. Птицына, С.Г. Руданова, И.Н. Долина, Ю.А. Санкина, В.С.Шанина, Н.В. Афанасьева, Э.Г. Шепелева, С.В. Сысуева, Е.Н. Дмитриенко, Т.П.Подсезерцеву, Е.В. Панину и В.П. Афиногеева за помощь в изготовлении ТМ; В.М.Першину за помощь в разработке КД; М.А. Овчинникова, С.М. Придчина и Д.Л. Юрьева за участие в разработке и изготовлении автоматизированной системы сбора данных и управления комплекса.

Список литературы

1. R.F. Casten, B.M. Sherrill, Prog. Part. Nucl. Phys., 45 (2000) 171.
2. G.M. Ter-Akopian et al., Phys. Lett., B426 (1998) 251.
3. R. Wolski et al., Phys. Lett., B467 (1999) 8.
4. A.M. Rodin et al., Nucl. Inst. Meth., B 126 (1997) 236.
5. N.S.Ganchuk et al. A radiation-safe container for D-T filling of laser targets. J. of the Moscow Physical Society., 1999, V.9, N.4, 289-294.
6. А.А. Юхимчук и др. Сосуд для хранения изотопов водорода. Патент РФ №2136064, Бюл.№24, 27.08.99.
7. К.Маккей. Водородные соединения металлов. М.: Мир, 1968.
8. А.Н.Перевезенцев, Б.М.Андреев, И.Л.Селиваненко. Глубокая очистка гелия с применением интерметаллических соединений на основе циркония. Высокочистые вещества, 1990, №1, 122-127.
9. В.В.Софьина и др. Исследование системы металл – водород. Препринт 29-93, ВНИИЭФ.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 февраля 2001 года.