

НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С ТРИТИЕМ И ЕГО СОЕДИНЕНИЯМИ

А. А. Юхимчук

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

arkad@triton.vniief.ru

Использование трития для исследований в области фундаментальной и прикладной науки имеет огромное значение. Он применяется при измерении массы и магнитного момента нейтрино; при изучении экзотических ядер с нейтронным гало, представляющих новую форму нейтронной материи; в исследованиях ядерных реакций синтеза, катализированных мюонами; в устройствах термоядерного синтеза с магнитным и инерциальным удержанием и т. д. Однако его широкое применение в фундаментальных и прикладных исследованиях сдерживается тем, что тритий, являясь радиоактивным изотопом водорода, при обращении с ним требует соблюдения норм радиационной безопасности, что, в свою очередь, связано с созданием специальных условий работы и специальных помещений. Согласно действующей в Российской Федерации нормативно законодательной базы в зависимости от количества трития работы делятся на 3 класса: 10^9 – 10^{11} Бк ($2,7 \cdot 10^{-3}$ – $2,7$ Ки) – работы 3 класса, 10^{11} – 10^{14} Бк ($2,7$ – $2,7 \cdot 10^3$ Ки) – работы 2 класса и более 10^{14} Бк ($2,7 \cdot 10^3$ Ки) – работы 1 класса. К каждому из классов предъявляются свои специфические требования по организации помещений. Задача в нашем случае осложняется тем, что эти помещения должны входить в состав уже действующих установок (ускорителей, реакторов и т. п.), либо располагаться в непосредственной близости к ним. Для решения этой задачи требуется выработка новых подходов и технических решений, позволяющих создавать радиационно-безопасное оборудование для работ с тритием на действующих физических установках с соблюдением нормативной базы РФ.

В статье приведены:

- действующие в РФ нормы и правила обращения с тритием и его соединениями, а также их сравнение с нормами и правилами, действующими в США и Европе;
- подходы к построению тритиевых систем и установок, позволяющие создавать оборудование и проводить работы с тритием в помещениях специально не предназначенных для этих целей при соблюдении действующей нормативной базы;
- типовое оборудование для работы с тритием;
- в качестве примеров приведены установки и комплексы различного назначения.

1. Тритий и его свойства

В 1933 г. N. L. Gilbert высказал предположение о существовании трития [1], а в 1934 г. в Кавендишской лаборатории в группе, возглавляемой Резерфордом, в экспериментах по изучению реакции D+D [2] экспериментально были зарегистрированы продукты реакции ${}^3\text{He} + n$ и ${}^3\text{H} + p$, при этом тритий считался стабильным элементом. Лишь в 1946 г. W. F. Libby [3] удалось зарегистрировать его радиоактивность.

Тритий является β -распадчиком. В процессе β -распада рождается ${}^3\text{He}$, электрон e^- и электронное антинейтрино ν_e : ${}^3_1\text{H} (T) \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e (5,685\text{кэВ})$.

Тритий – радиоактивный газ без цвета, запаха и вкуса.

Как и все изотопы водорода имеет высокие коэффициенты диффузии и проницаемости в материалах, в первом приближении меньше от соответствующих величин для водорода (протия) на mt/mn .

Электронная структура, химические свойства те же, что и для протия и дейтерия, скорости химических реакций отличаются на разницу отношения масс. Однако тритий вызывает радиолит (разложение химических соединений под действием ионизирующего излучения), при этом энергия активации некоторых химических реакций может отличаться по отношению к протию и дейтерию.

В табл. 1 приведены некоторые свойства трития [4–7], которые будут полезными при создании установок и комплексов.

Таблица 1

Свойства трития

Вес: атомарный, г молярный, г	3,01605 6,03210
Диаметр атома, Ангстрем	1,1
Тип распада	β^- (100 %)
Продукт распада	${}^3\text{He}$ ($m = 3,01603$ г)
Постоянная полураспада, $T_{1/2}$, лет $T_{1/2}$, дней	$12,232 \pm 0,004$ (1 год = 365,25 дней) $4500,88 \pm 1,46$
Для учета трития (DOE, США), $T_{1/2}$, лет (РФ), $T_{1/2}$, лет	$12,33 \pm 0,06$ 12,3
Постоянная распада $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$, с^{-1}	$1,782 \cdot 10^{-9}$
Энергия распада максимальная, кэВ средняя, кэВ	18,582 5,685
Тепловыделение от распада	$0,328$ Вт/г = $1,954$ Вт/моль
Энергия ионизации $T \rightarrow T + e^-$, эВ $T_2 \rightarrow 2T$, эВ	13,55 4,591
Удельная радиоактивность T_2 (газ)	$355,9$ ТБк/г ($9,619$ кКи/г) $2146,9$ ТБк/моль ($58,023$ кКи/моль) $2,589$ Ки/ $\text{см}^3 = 0,386$ $\text{см}^3/\text{Ки}$ (при 1 атм, 273 К) $2,372$ Ки/ $\text{см}^3 = 0,422$ $\text{см}^3/\text{Ки}$ (при 1 атм, 298 К)
Удельная радиоактивность T_2O	3200 Ки/ см^3

Окончание таблицы

Плотность T2 (газ) при н.у., 103 г/см ³	0,269122
Температура кипения при 1 атм., К	25
Пробег β ⁻ частиц в воздухе (н.у.), см	0,036 (5,7 кэВ); 0,45 (18,6 кэВ)
T2 (газ н.у.), см	0,26 (5,7 кэВ); 3,2 (18,6 кэВ)
воде (сухом материале, масле, полимерах при ρ = 1 г/см ³), мкм	0,42 (5,7 кэВ); 5,2 (18,6 кэВ)
в стали, мкм	0,06 (5,7 кэВ)

2. Нормы и правила обращения с тритием и его соединениями

В Российской Федерации на сегодняшний день обращение с тритием регулируется следующими нормативными документами:

1. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99/2009 [8].
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99/2010) [9].
3. Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ – РТС – 04) [10].

В зависимости от активности используемого открытого радиоактивного источника трития на рабочем месте и с учетом его радиотоксичности работы разделяются на три класса (табл. 2.1 [10]).

Таблица 2.1

Класс работ с тритием для открытых радиоактивных источников [10]

Класс работ	Суммарная активность на рабочем месте, Бк (Ки)
I класс	Более 10 ¹⁴ (2,7·10 ³)
II класс	от 10 ¹¹ до 10 ¹⁴ (2,7–2,7·10 ³)
III класс	от 10 ⁹ до 10 ¹¹ (0,027–2,7)

При хранении открытых радиоактивных источников в хранилищах (складах) внутри контейнеров допускается увеличение активности в 100 раз. Контейнеры для хранения трития должны иметь санитарно-эпидемиологическое заключение на соответствие санитарным правилам.

В США ядерные установки делятся по категориям риска (Hazard Category) и, так-же как и в РФ, зависят от количества трития. Классификация установок приведена в табл. 2.2.

В табл. 2.3. приведены, регламентированные НРБ – 99/2009 [8] значения дозовых коэффициентов, предела годового поступления трития в организм человека с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности трития в воздухе для персонала, работающего с тритием.

Таблица 2.2

Классификация ядерных установок, содержащих тритий в США [6]

Категория риска	Количество трития, г	Характеристика установки
I		Характерно для ядерных реакторов. Установки, работающие только с тритием не классифицируются по этой категории
II	более 30	
III	1,6–30	
IV	100 Ки-1,6	100 Ки – по классификации РФ – минимально значимая активность (МЗА)
не радиационные установки	менее 100 Ки	В случае, если на этих установках не содержатся другие радионуклиды выше МЗА

Таблица 2.3

Значения дозовых коэффициентов, предела годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности трития в воздухе для персонала

Тип соединения при ингаляции	Дозовый коэффициент возд Еперс, Зв/Бк	Предел годового поступления ПППЕРС, Бк (Ки) в год	Допустимая среднегодовая объемная активность ДОА _{ПЕРС} , Бк/м ³ (Ки/л) в США [6]
Г1-пары тритированной воды	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^9(0,03)$	$4,4 \cdot 10^5(1,2 \cdot 10^{-8})$ $7 \cdot 10^5$
Г2-газообразный тритий	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{13}(300)$	$4,4 \cdot 10^9(1,2 \cdot 10^{-4})$ $9 \cdot 10^9$
Г3-тритированный металл	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{11}(3)$	$4,4 \cdot 10^7(1,2 \cdot 10^{-6})$

Как видно из таблицы допустимые среднегодовые объемные активности в США примерно в 2 раза выше, чем в РФ.

Для каждого из классов нормативными документами [8–10] четко оговаривается организация работ: лицензирование, устройство площадок и помещений, требования к оборудованию, вентиляции, водоснабжению и канализации, организации радиационного контроля и т. п. Однако, как было сказано ранее, в ряде случаев для экспериментальных установок и комплексов выполнение всех этих требований в полном объеме не представляется возможным и требуется выработка новых подходов и технических решений, позволяющих создавать радиационно-безопасное оборудование для работ с тритием на действующих физических установках с соблюдением нормативной базы РФ.

К таким решениям можно отнести:

- создание устройств содержащих тритий или его соединения, классифицируемых как закрытые радиоактивные источники. Согласно НРБ-99/2009

[8] «Источник радионуклидный закрытый – источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан»;

- использование в работе минимально значимых активностей (МЗА) трития для открытых источников. Согласно НРБ-99/2009 [8] МЗА по тритию составляет 10^9 Бк ($0,027$ Ки)¹, а минимально значимая удельная активность (МЗУА) – 10^6 Бк/г ($2,7 \cdot 10^{-5}$ Ки/г).

3. Подходы к построению тритиевых систем и установок

Существуют различные подходы по общей компоновке тритиевых установок исследовательского класса. Однако при всех подходах сохраняется принцип тройного рубежа защиты для элементов установки, несущих в себе повышенную опасность, например, тритий находится под давлением выше атмосферного и двойного рубежа – при низких (до 10 Ки) активностях трития или пониженных давлениях тритийсодержащей среды. В ряде случаев (например, [11]) построение установки не отходит от традиционной схемы (см. рис. 3.1), присущей специализированным тритиевым лабораториям, когда оборудование размещается в изолированном вентилируемом домике. Для этих целей создаются, как правило, металлические домики относительно больших объемов (вплоть до 100 м^3) в которых размещаются герметичные перчаточные боксы объемом $0,5\text{--}5 \text{ м}^3$ с функциональным оборудованием внутри. В процессе нормальной работы вентиляционный поток воздуха внутри домика составляет $500\text{--}600 \text{ м}^3/\text{час}$ (5–6 кратный обмен в час), в случае крайней необходимости

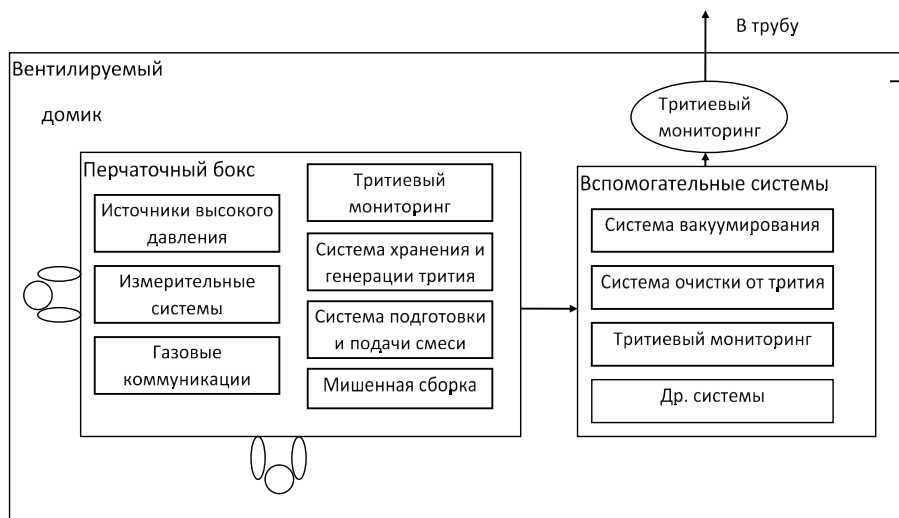


Рис. 3.1. Функциональная схема построения тритиевой установки с использованием вентилируемого домика

¹Для сравнения, в США эта величина составляет 100 Ки, а в Швейцарии – 80 Ки, что более чем на три порядка выше, принятых в РФ норм.

поток может быть увеличен до 6000 м³/час (60 кратный обмен в час). Весь этот поток поступает в вентиляционную трубу, высота которой достигает несколько десятков метров. Вентиляционная система, как правило, имеет резервный источник энергопитания на случай возникновения неисправностей основной системы. Перчаточные боксы, помещенные в такой домик, работают под небольшим избыточным давлением порядка 10–30 мм вод. ст. инертной среды (как правило, это чистый Ar). Однако в процессе монтажа (демонтажа) тритийсодержащих узлов, в боксе создается разрежение примерно тех же 10–30 мм вод. ст.

Утечки среды бокса в процессе его эксплуатации не должны превышать величины 10⁻⁵ торр л/с. Бокс оборудован системой радиационного мониторинга утечек трития в среду бокса из газовых коммуникаций системы тритиевого обеспечения. Уровень объемной активности в боксе не более 10⁻⁶ Ки/л поддерживается замкнутой системой тритиевой очистки, через которую рециркулирует среда бокса. Очистка производится на интерметаллидных ловушках. Перед любым сбросом среды бокса в вентиляционную трубу, последняя в обязательном порядке проходит через систему тритиевой очистки.

Как видно из вышеприведенного описания построения установок на базе вентилируемых домиков, тройной рубеж защиты в этом случае обеспечивается следующим образом:

- первый рубеж – собственно функциональные газовые коммуникации тритиевой установки;
- второй рубеж – перчаточный бокс, находящийся под избыточным давлением инертной среды. В боксе контролируется радиационная обстановка и происходит постоянная очистка его среды;
- третий рубеж – вентилируемый домик.

В случае разгерметизации функциональных газовых коммуникаций, тритий, попавший в среду бокса, будет удален из него с помощью системы тритиевой очистки. В аварийных ситуациях при разгерметизации бокса тритий может выйти за его пределы. В этом случае он окажется внутри вентилируемого домика и будет выброшен в вентиляционную трубу. Доступ оперативного персонала к установке в этом случае осуществляется в средствах индивидуальной защиты, снабженных независимой системой подачи воздуха.

Двойной рубеж защиты в таких установках обеспечивается следующим образом:

- первый рубеж – вспомогательные газовые коммуникации установки, находящиеся под избыточным давлением, но при низкой объемной активности тритийсодержащей смеси;
- второй рубеж – вентилируемый домик.

В этом случае разгерметизация первого рубежа приведет к незначительному выходу трития в вентилируемый домик и удалению его в вентиляционную трубу.

Существует и другой подход к построению тритиевых установок высокого давления [12–16], который позволяет работать вне специализированных тритиевых лабораторий без создания вентилируемых домиков. Функциональная схема такой установки представлена на рис. 3.2.

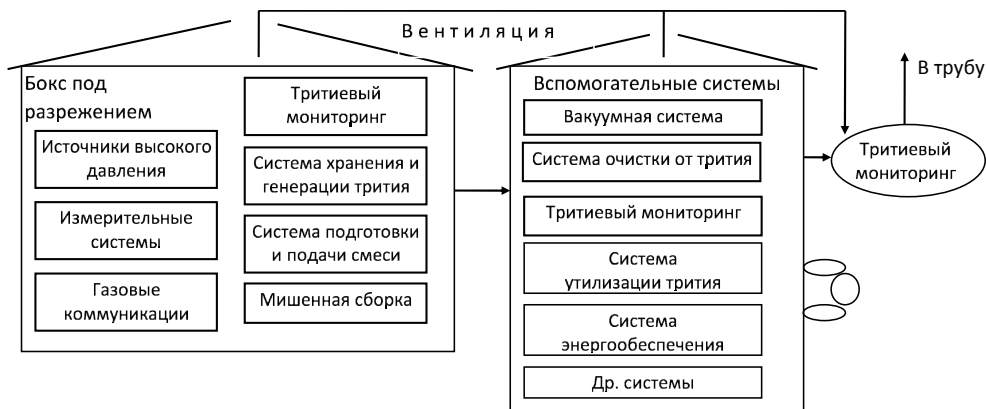


Рис. 3.2. Функциональная схема построения тритиевых установок без использования вентилируемых домиков

В этом случае функциональное оборудование высокого давления помещается в герметичный бокс (как правило, не перчаточный), имеющий дистанционное управление вентилями либо с помощью электроприводов, либо ручное с помощью уплотненных удлинительных тяг. Бокс заполнен инертным газом и заведомо находится под разрежением, величина которого рассчитывается из условия, что если весь имеющийся в функциональных коммуникациях газ выйдет за их пределы, то, с учетом температурных колебаний внутри бокса, давление в нем будет ниже атмосферного.

Среда бокса постоянно контролируется с помощью проточной ионизационной камеры (рециркуляция среды через камеру обеспечивается малогабаритным герметичным компрессором), либо с помощью диффузионной ионизационной камеры смонтированной непосредственно внутри бокса. Как правило, размеры таких боксов невелики, объем их не превышает $0,3-0,5 \text{ м}^3$. Бокс соединен с системой очистки газовой среды от трития, оборудован системой питания инертным газом, системой продувки воздухом, вытяжной вентиляцией (при необходимости) и другими технологическими коммуникациями и измерительными устройствами. В случае превышения уровня радиационного фона в боксе производится очистка его газовой среды, при этом содержимое бокса рециркулирует через систему газовой очистки до тех пор, пока уровень загрязненности бокса не достигнет допустимой величины. В случае необходимости смены среды в боксе производится вакуумирование бокса с помощью форвакуумных насосов. Выхлоп насосов контролируется системой раннего предупреждения, в функции которой входит предотвращение выброса в окружающую среду газа с объемной активностью, превышающей установленный порог срабатывания системы. При превышении установленного порога автоматически срабатывает электромагнитный клапан, запирающий выход газа в вентиляционную трубу, выключается насос, и газовая среда направляется на повторную очистку.

Вспомогательные газовые коммуникации бокса, которые всегда находятся при давлении ниже атмосферного, размещаются в вытяжных шкафах,

среда которых постоянно контролируется с помощью радиометра с проточной ионизационной камерой.

При такой схеме построения установки тройной рубеж защиты обеспечивается следующим образом:

- первый рубеж – как и в первом случае, собственно функциональные газовые коммуникации тритиевой установки;
- второй рубеж – пониженное давление инертной среды бокса;
- третий рубеж – герметичный бокс или иные конструкции, обеспечивающие поддержание во втором рубеже давления ниже атмосферного.

При разгерметизации первого рубежа тритий попадает в среду бокса, при этом давление в боксе остается ниже атмосферного, что предотвращает дальнейшее распространение трития. После того, как факт поступления трития в среду бокса будет зафиксирован, производится очистка бокса. Разгерметизация самого бокса фиксируется повышением давления в нем. При этом все операции с тритием прекращаются, управление установкой переводится в режим постоянной очистки среды бокса и ведется поиск и устранение течи.

Двойной рубеж защиты в таких установках обеспечивается следующим образом:

- первый рубеж – вспомогательные газовые коммуникации установки, находящиеся под давлением ниже атмосферного;
- второй рубеж – вытяжные шкафы.

При разгерметизации первого рубежа в газовых коммуникациях установки произойдет падение вакуума, которое будет зафиксировано приборами, что свидетельствует о нештатном состоянии установки. При этом, за счет диффузии, незначительное количество трития может выйти во второй рубеж, что будет зафиксировано приборами радиационного контроля и удалено с помощью вытяжной вентиляции.

Известны тритиевые установки высокого давления [17], которые используют лишь два радиационных рубежа защиты, тем не менее, наиболее опасные устройства этих установок выполнены с тройным рубежом защиты.

4. Типовое оборудование для работы с тритием

К функциональным элементам тритиевых установок высокого давления относятся те элементы, которые собственно и обеспечивают выполнение основных функций данной установки, это: компримирующие устройства; устройства хранения, очистки и подготовки рабочей смеси; средства контроля и измерений температуры, давления, состава смеси (при необходимости) и др. параметров; арматура газовых коммуникаций.

а) Компримирующие устройства

В качестве компримирующих устройств в тритиевых установках высокого давления могут использоваться [18–20]: механические устройства (дожиматели [14], мультипликаторы [21–22], мембранные компрессоры [14]), тепловые насосы [17] (насосы на базе фазовых превращений), металлгидридные генераторы [18–21]. Каждое из этих устройств имеет свои положительные

и отрицательные стороны и выбор того или иного устройства диктуется условиями проведения эксперимента. Зачастую в одной и той же установке для разных операций может использоваться сочетание выше перечисленных способов и устройств.

Преимущества, недостатки и возможные области применения каждого из этих устройств приведены ниже.

Механические устройства:

преимущества: работа при комнатных температурах, возможность получения высоких [23, 24] давлений, высокая производительность, широкая известность применяемого принципа и, как следствие, наличие промышленно выпускаемых образцов;

недостатки: сложность конструкции, наличие подвижных элементов, низкая чистота газа, высокие габаритно-весовые характеристики, относительно высокие (1–15 МПа) начальные давления питания, высокое давление во вспомогательных газовых коммуникациях, а соответственно большой удельный вес балластного газа;

возможная область применения: области, где требуются повышенные давления (более 100 МПа) и в которых не регламентируется чистота газа и его суммарная активность.

Тепловые насосы:

преимущества: низкие давления во вспомогательных газовых коммуникациях (менее 0,1 МПа), а, соответственно, малый удельный вес балластного газа, высокие (до 200 МПа) [25–27] рабочие давления, отсутствие источника примесей;

недостатки: наличие криогенной техники, позволяющей получать температуры менее 20 К;

возможная область применения: как правило, это устройства, в которых, собственно, и происходят исследуемые процессы.

Металлогидридные генераторы:

преимущества: высокие (до 400 МПа) [18–20] рабочие давления, дополнительная очистка газа от примесей, низкие равновесные давления в условиях длительного хранения, простота конструкции, возможность плавного реверсивного изменения давления;

недостатки: повышенная температура генерации газа, что приводит к диффузионным утечкам газа, высокое давление во вспомогательных газовых коммуникациях, а, соответственно, и большой удельный вес балластного газа;

возможная область применения: длительное безопасное хранение трития, области, где требуются повышенные давления, и регламентируется чистота газа [12–13].

б) Устройства хранения изотопов водорода

Нерадиоактивные изотопы водорода, как правило, хранятся в стандартных баллонах под давлением до 15 МПа, хотя по удельным характеристикам и с соображения безопасности их удобнее хранить на гидридах металлов. Так для хранения 21 кг H₂ [28] в газообразном виде при 14 МПа необходим контейнер массой 1020 кг и объемом 1,869 м³, а при хранении этого же количе-

ства на гидриде ванадия 40 %-ой пористости масса контейнера будет практически той же 1080 кг, а объем будет $0,312 \text{ м}^3$, что в 6 раз меньше. Да и давление при температуре хранения будет меньше атмосферного, а при необходимости получения давления 14 МПа данный гидрид надо нагреть лишь до температуры $\sim 100^\circ\text{C}$.

Тритий хранят, как правило, на металлгидридных ловушках (в основном урановых), хотя могут применяться и малогабаритные баллоны [6, 14].

в) Устройства очистки изотопов водорода

Очистку изотопов водорода от примесей можно проводить следующими методами [29]: металлгидридным, твердофазные реакции, конденсацией, адсорбцией с каталитической конверсией примесей, изотермической циклической адсорбцией, разделением на микропористых полимерных мембранах, разделением на палладиевых мембранах, электрохимическим с твердым полимерным электролитом. Однако для наших целей чаще всего применяются следующие методы: разделение на палладиевых мембранах, металлгидридная очистка, конденсация. При этом, в случае хранения изотопов водорода на металлгидридах, очистка изотопов водорода получается автоматически. Криогенная очистка осуществляется прокачкой водорода через устройства, охлажденные, как правило, до температуры жидкого азота и применяется в тех случаях, когда особо не регламентируется чистота смеси. В случае жесткой регламентации по чистоте газа применяются палладиевые мембраны. На практике широко применяется два типа мембран: пластинчатые и трубчатые. Диапазон давлений, при которых работают мембраны, не очень высок ($0,3\text{--}3 \text{ МПа}$). Однако во ВНИИЭФ разработаны и успешно эксплуатируются палладиевые мембраны [30], работающие при давлениях до 80 МПа. Эти мембраны изготовлены из капиллярных трубок $\varnothing 0,5 \times 0,15$ палладий серебряного сплава В1.

з) Системы подготовки рабочей смеси

Система подготовки смеси включает в себя калиброванный объем, оснащенный точными датчиками давления. В объем подается один из компонентов смеси, по величине давления рассчитывается необходимое количество данного компонента, затем отмеренное количество газа направляется либо непосредственно в приемник (например, сосуд, находящийся при температуре 20 К [17]), либо на металлгидридную ловушку [12–13, 31], в зависимости от того с каким молекулярным составом смеси в последующем будет производиться работа. После этой процедуры мерный объем вакууммируется, а затем в нем тем же образом отмеряется следующий компонент смеси. В случае необходимости работы с равновесным молекулярным составом смеси может производиться ее гомогенизация [12–13, 31].

д) Средства измерения давления

Диапазон измеряемых давлений в тритиевых установках высокого давления довольно широк от 10^{-4} Па до нескольких сотен МПа. Для измерения низких давлений ($10^{-4}\text{--}10^2$ Па) после соответствующей доработки использу-

ются стандартные ионизационные и термоэлектрические преобразователи. Для обеспечения безопасности эти преобразователи помещаются в герметичные защитные кожуха. Диапазон давлений от 10^2 Па до 0,3 МПа измеряется обычными мановакуумметрами с трубкой Бурдона либо дифференциальными тензометрическими преобразователями. Диапазон давлений 0–600 МПа измеряется тензометрическими преобразователями давления (strain-gauge pressure transducers) [14], либо пьезоэлектрическими кварцевыми датчиками давления [22] (piezoelectric quartz pressure transducer). Причем номинал датчика по давлению выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальную чувствительность датчика при минимальной погрешности измерений в заданном диапазоне. Это означает, что рабочий диапазон давлений может измеряться несколькими датчиками различного номинала.

е) Средства измерения состава смеси

Во многих случаях, при проведении экспериментов необходимо знать не только изотопный состав смеси, но и ее молекулярное, а иногда и спиновое состояние. Наиболее распространенными на сегодняшний день методами измерения состава смеси являются масс-спектрометрический [17] и хроматографический метод [32], кроме того, используется радио хроматографический [11, 33] метод. Все эти методы основаны на отборе проб, т. е. анализ производится вне того объема, где находится анализируемая смесь. В работах [12, 13, 34] было показано, что данные методы могут исказить результаты измерений молекулярного состояния смеси. Более тщательное рассмотрение этого вопроса [35, 36] показало, что существует методическая ошибка при измерении этими методами. Здесь же был сделан вывод о том, что наиболее достоверным методом анализа молекулярного состава смеси является спектроскопический метод, основанный на комбинационном рассеянии света (КРС). В настоящее время КРС методики анализа изотопного и молекулярного состава смесей изотопов водорода активно внедряются в практику [37–40].

ж) Средства измерения активности трития

Одним из основных условий безопасной работы тритиевых установок является своевременное детектирование утечек трития. Для этих целей применяются радиометры с ионизационными камерами. При этом анализируемая среда подается во внутрь камеры. Для постоянного контроля необходимо обеспечить постоянный доступ анализируемой среды в камеру. Это достигается либо прокачкой анализируемой среды через внутренний аналитический объем камеры, либо помещением ионизационной камеры непосредственно в анализируемую среду (герметичный бокс). Во втором случае наружный корпус камеры выполняется таким образом, чтобы с одной стороны обеспечить беспрепятственный доступ анализируемой среды к собирающему электроду, а с другой – обеспечить экранирование электрических наводок. В настоящее время промышленностью выпускается довольно широкий набор радиометров для измерения объемной активности трития в воздухе. Ряд из этих приборов приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристики радиометров для измерения объемной активности трития в воздухе

Наименование прибора	Тип детектора	Объем детектора, чувствительный (общий), см ³	Нижний предел измерения, Бк/м ³
Дозиметр портативный (UCRL-50007-68-2, 1968, р. 34–40)	Газовый счетчик с тонким окном большой площади		$2 \cdot 10^5$
LB 110 стационарный (Германия)	Газовый счетчик внутреннего наполнения, прокачка 0,17 л/мин	325 (1300)	$0,9 \cdot 10^3$
ТМН2 переносной (Германия)	Газовый счетчик внутреннего наполнения, прокачка 0,25 л/мин	110 (300)	$1,5 \cdot 10^4$
750 SBA JC носимый (Франция)	Прокачная ионизационная камера, 4 л/мин	750	$1,1 \cdot 10^6$
РГБЗ-01 носимый (Россия)	Прокачная ионизационная камера, 7 л/мин	800	$1,5 \cdot 10^6$
Радиометр газов РГБ-06 (Россия)	Прокачная или диффузионная рабочая камера	10 000	$5 \cdot 10^4$
Блок детектирования БДГБ-14И (Россия)	Прокачная рабочая камера	10 000	$4 \cdot 10^4$
Блок детектирования БДГБ-14И-1 (Россия)	Диффузионная рабочая камера	200	$4 \cdot 10^7$

з) Рабочие камеры (мишени) высокого давления

Конструкции рабочих камер могут быть совершенно разными, в зависимости от того, какие требования предъявляются к ним по условиям эксперимента: уровень давлений, диапазон рабочих температур, ресурс, требования по чистоте дейтерий тритиевой смеси и т. д. Свободный внутренний объем камеры должен быть минимально возможным, чтобы с одной стороны – удовлетворить требованиям проведения экспериментов, а с другой – обеспечить присутствие минимально возможного количества тритийсодержащего газа. Основными вопросами при создании камеры являются вопросы обеспечения прочностной надежности и радиационной безопасности, связанной с проникаемостью трития через оболочку камеры [41]. Решение этих вопросов осуществляется несколькими путями:

- выбором соответствующего конструкционного материала, обладающего достаточной водородной и тритиевой стойкостью и необходимыми прочностными характеристиками при низких коэффициентах проникаемости трития (например, бериллиевая бронза (beryllium-copper alloy) [22] или высокопрочные никелевые сплавы аустенитного класса [23, 42–45]);

- защитой внутренней поверхности силового корпуса металлом, слабо взаимодействующим с водородом и имеющим низкие коэффициенты проницаемости трития (например, золотом [46], медью [14], нитридом титана [25] и т. п.);
- созданием конструкции с высокими удельными прочностными характеристиками, обладающей вакууммно-газовым тритиевым барьером [25, 47, 48].

Для обеспечения безопасности проведения работ рабочие камеры непосредственно соединяются с датчиками давления и имеют, как правило, два запирающих вентиля, чтобы в случае неисправности одного из них, можно было произвести сброс газа с рабочей камеры с помощью другого.

5. Обеспечению безопасности тритиевых установок

Резервные источники электропитания

Все исполнительные механизмы устройств в которых в случае выхода из строя электропитания может реализоваться аварийная ситуация и контрольные приборы этих устройств, должны иметь резервные источники питания на случай перебоя основного электропитания. Это: приборы радиационного контроля; приборы контроля за состоянием аварийно опасных устройств; энергопотребляющие элементы аварийно опасных устройств; двигатели системы вентиляции. В качестве резервных источников могут использоваться мотор-генераторы на базе двигателей внутреннего сгорания, аккумуляторные батареи и другие источники питания, обеспечивающие безопасную эксплуатацию установки на время эвакуации трития и приведения ее в безопасное состояние.

Аварийная система эвакуации тритийсодержащего газа

Установка должна быть оборудована средствами, которые в случае непредвиденных обстоятельств позволили бы хранить тритийсодержащий газ либо в связанном состоянии, либо при давлениях ниже атмосферного. В первом случае используются металлгидридные ловушки на основе урана либо титана. При этом расчетное количество металлгидрида в ловушках должно быть таким, чтобы, как минимум с двойным запасом обеспечить эвакуацию всего газа, имеющегося в коммуникациях. Во втором случае используются вакууммированные ресиверы, объем которых выбирается таким образом, чтобы после напуска в них всего имеющегося в коммуникациях газа давление в них не превысило атмосферного.

Организационные меры

К работе на установке допускается лишь персонал, прошедший специальное обучение приемам работы на установке. Разрабатывается технологическая карта, по которой будут проводиться работы. Перед работой с тритием, с целью тренировок персонала и отработки режимов работы установки, проводится полный цикл работ с одним из нерадиоактивных изотопов водорода. Моделируются возможные аварийные ситуации и разрабатываются приемы по

выходу из них. В случае круглосуточной работы организовываются смены, в состав которых входит руководитель смены и, как минимум, два человека оперативного персонала.

Технические меры

Все аварийно опасные узлы установки, должны быть оснащены блокирующими устройствами, которые не позволяли бы произвести несанкционированное действие, в результате которого могла бы произойти аварийная ситуация. Для контроля за состоянием узлов установки применяется мнемосхема. Кроме того, для этих целей в настоящее время используются системы автоматического контроля и управления на базе персонального компьютера. Эти системы позволяют:

- контролировать правильность действий оперативного персонала, звуковым и световым образом оповещать об ошибочных действиях;
- не допускать выполнение операций в результате которых может произойти нештатная ситуация работы системы;
- отображать текущее состояние узлов установки;
- вести протокол работы установки;
- по требованию оператора вести поиск необходимой информации;
- в on-line режиме обрабатывать результаты эксперимента и т. п.

Радиационный мониторинг

Помимо функционального оборудования, в состав которого входят приборы дозиметрического контроля, радиационная обстановка должна контролироваться в зоне работы оперативного персонала, на всех выходах вытяжных шкафов и в вентиляционной трубе на выбросе в атмосферу.

6. Примеры построения тритиевых систем для проведения фундаментальных исследований

6.1. Комплекс подготовки газовой смеси ИВ для исследований мюонного катализа

Для систематических исследований мюонного катализа ядерных реакций синтеза в тройных смесях изотопов водорода Н/Д/Т в диапазоне температур 20–800 К, давлений до 120 МПа и активностях трития в свободном состоянии до 10 кКи совместными усилиями РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна) создана установка «ТРИТОН». Установка состоит из: комплекса для подготовки газовой смеси (КПГС) [31], криогенной установки [49], системы детектирования и регистрации продуктов ядерных реакций [50] и ряда сменных мишеней [51–56].

КПГС предназначен для обеспечения безопасного проведения работ с тритием в количествах до 1 г (10 кКи) при подготовке смеси заданного изотопного состава чистотой 10^{-7} об. долей по примесям с $Z > 1$, подаче ее в мишень и утилизации после завершения работ. Одним из основных требований при создании КПГС являлось обеспечение радиационной безопасности прово-

димых на нем работ. С этой целью на любом возможном пути проникновения трития в атмосферу обеспечено три рубежа защиты для элементов установки, находящихся под давлением трития выше атмосферного, и два рубежа для остальных коммуникаций – при низких (до 10 Ки) активностях трития или пониженных давлениях тритийсодержащей среды.

Работы по созданию комплекса были начаты в сентябре 1995 г., а в декабре 1996 г. комплекс был смонтирован в низкофоновой лаборатории фазотрона ЛЯП ОИЯИ. В 1997–1998 гг. на установке «ТРИТОН» проведены эксперименты прямого измерения коэффициента прилипания ω_s и выхода нейтронов в бинарной и тройной смесях изотопов водорода при 20К и прямого измерения выхода нейтронов в газообразной смеси изотопов водорода при 300–800 К и давлении до 120 МПа. Комплекс успешно эксплуатируется вплоть до сегодняшнего дня. В мае 2016 г. проведен сеанс по измерению парциальных выходов каналов ядерных реакций в системе $p\mu$ [57]. За это время в КППС было использовано более 100 кКи трития. В течение 20 лет КППС работал надежно, превышения установленных норм по объемному содержанию трития в рабочей зоне и вытяжной вентиляции зафиксировано не было.

Конструктивно комплекс состоит из 10 связанных между собой установок и систем (см. рис. 6.1) [31]:

- герметичного бокса, в котором расположены основные функциональные элементы КППС, обеспечивающие подготовку смеси заданного состава и чистоты и подачу ее к мишени;
- вакуумного пульта, обеспечивающего вакуумирование рабочих газовых коммуникаций, утилизацию основного количества тритийсодержащей газовой смеси и молекулярный анализ газовой смеси;
- ресивера, предназначенного для сброса «хвостов» газовой смеси с выхлопов формакуумных насосов;
- установки газовой очистки, предназначенной для очистки газовых смесей от следов трития и его соединений, находящихся в герметичных объемах (боксе, ресивере и т. п.);
- установки раннего предупреждения выбросов, предназначенной для предотвращения выбросов в атмосферу газовых смесей, содержащих тритий выше установленных норм;
- сборки насосов, обеспечивающей вакуумирование газовых коммуникаций, герметичных технологических объемов, ресивера и т. п.;
- баллонного поста, обеспечивающего подачу диффузионно чистых протия и дейтерия к КППС, заполнение герметичных технологических объемов инертным газом и питание газового радиохроматографа газом - носителем;
- системы радиометрического контроля, обеспечивающей контроль состояния элементов КППС и радиационной обстановки в рабочей зоне;
- электрического пульта, обеспечивающего управление и контроль КППС и МВД;

• автоматизированной системы контроля, обеспечивающей контроль состояния основных элементов КПГС и МВД, а также автоматическую запись протокола эксперимента.

Разделение комплекса на отдельные независимые установки позволило ускорить его проектирование, изготовление и отладку. Кроме того, такое построение КПГС позволило осуществить его транспортировку в 1996 г. из Арзамаса-16 в Дубну в виде отдельных независимых работающих установок без их демонтажа, последующей сборки и сколь-нибудь существенной наладки.

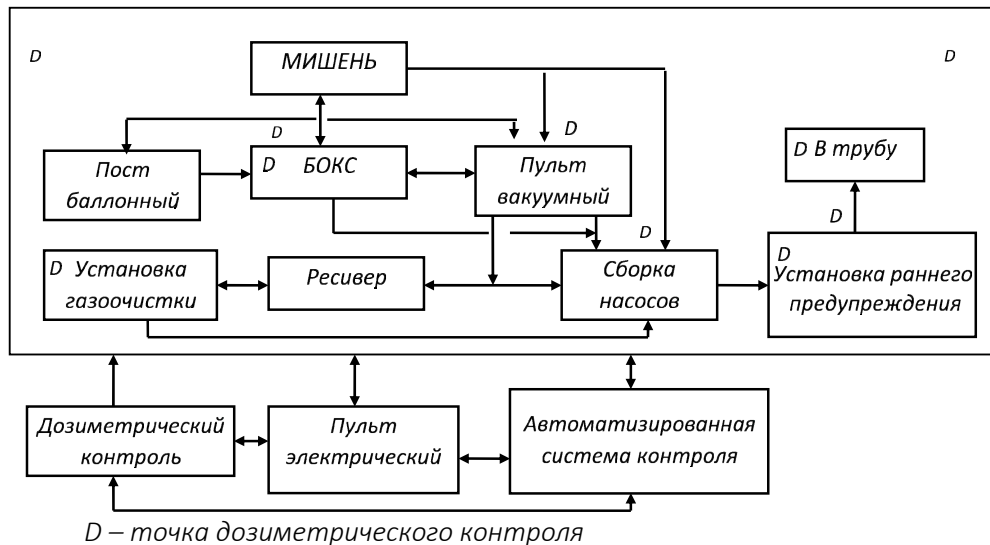


Рис. 6.1. Блок-схема КПГС [31]

6.2. Комплекс оборудования для исследований нейтронно-избыточных ядер

Исследование структуры экзотических легких ядер и ядерных систем, находящихся на границе нейтронной стабильности, имеет фундаментальное значение в ядерной физике и представляет в настоящее время одно из центральных направлений в изучении ядерной структуры. Реакции передачи нуклонов с применением пучков радиоактивных ядер предоставляют очень хорошие возможности для таких исследований.

В рамках создания ускорительного комплекса радиоактивных пучков (проект DRIBs) было предусмотрено получение пучков молекулярных ионов изотопов водорода (ИВ), включая тритий, что позволяло приступить к экспериментам по изучению резонансных состояний ядер ${}^4\text{H}$ и ${}^5\text{H}$, образующихся в реакциях $t + t \rightarrow {}^5\text{H} + p$, $t + t \rightarrow {}^4\text{H} + d$ и $t + d \rightarrow {}^4\text{H} + p$. Доставка на мишень первичного пучка тритонов, ускоренных на циклотроне У-400М осуществлялась с помощью сепаратора ACCULLINA [58]. Требуемая интенсивность пучка ионов трития на мишени должна быть порядка 10^8 ион/с, а с учетом потерь при транспортировке и монохроматизации пучка интенсивность ускоренного пучка ионов трития должна составлять 10 нА ($6 \cdot 10^{10}$ ион/с).

Для решения этой задачи в РФЯЦ ВНИИЭФ была создана система, предназначенная для подачи в высокочастотный источник ионов циклотрона У-400М Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) ОИЯИ изотопных молекул водорода при заданном соотношении их потоков и концентраций и утилизации смеси изотопов водорода после завершения работ [59].

Система подачи изотопов водорода (СПИВ) состоит из 3 функционально связанных между собой структурных элементов:

- блока подачи изотопов водорода (БПИВ), обеспечивающего подачу изотопных молекул водорода заданного состава в ионный источник циклотрона У-400М и тонкую регулировку потоков этих молекул;
- системы утилизации (СУ) трития при проведении технологических операций с газовыми коммуникациями СПИВ и очистке криогенных насосов ионного источника циклотрона У-400М;
- автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ), обеспечивающей контроль состояния элементов комплекса, автоматическое поддержание рабочих параметров, графическое и цифровое отображение контролируемых процессов, ведение протокола эксперимента и дистанционное (с пульта циклотрона) управление элементами системы.

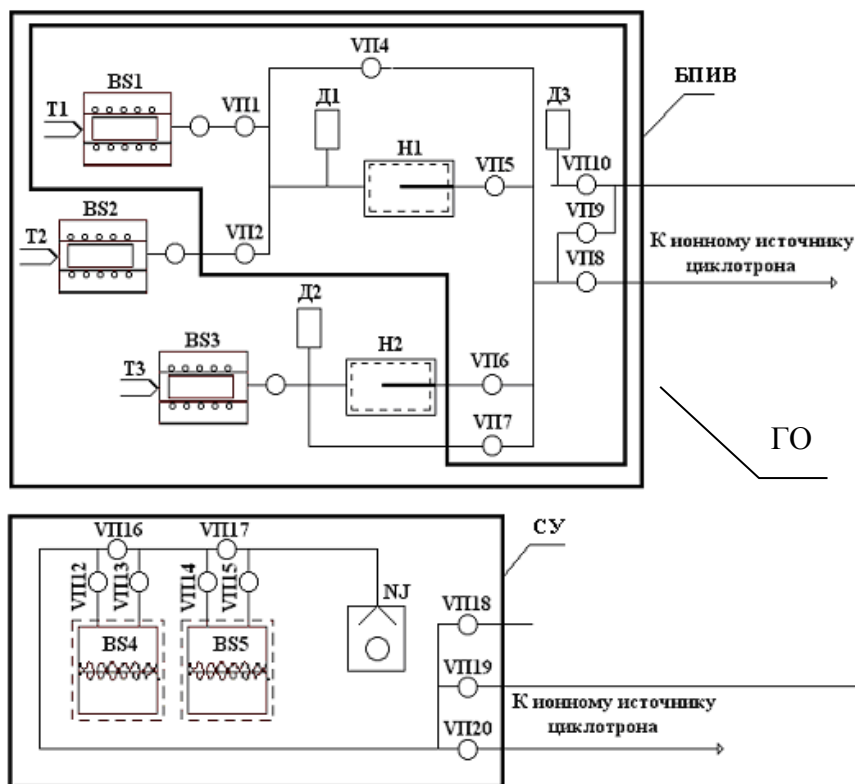


Рис. 6.2. Принципиальная схема СПИВ [54]: BS1-BS3 – источники ИВ; BS4-BS5 – поглотители ИВ; Н1, Н2 – натекатели; Д1–Д3 – датчики давления (CMR271, APR266 и TPR261 соответственно); NJ – насос форвакуумный (ВОС EDWARDS GVSP30); VП – вентили сильфонные вакуумные; Т – терморпары; ГО – герметичный объем

Принципиальная схема СПИВ представлена на рис. 6.2, а ее общий вид – на рис. 6.3.

Структура и конструктивное исполнение системы и ее элементов диктовалось требованиями к параметрам смеси ИВ, подаваемой в ионный источник, и правилами соблюдения норм радиационной безопасности при работе с тритием. Основные решения газовой схемы СПИВ, использованные авторами при ее разработке, приведены в работе [60].

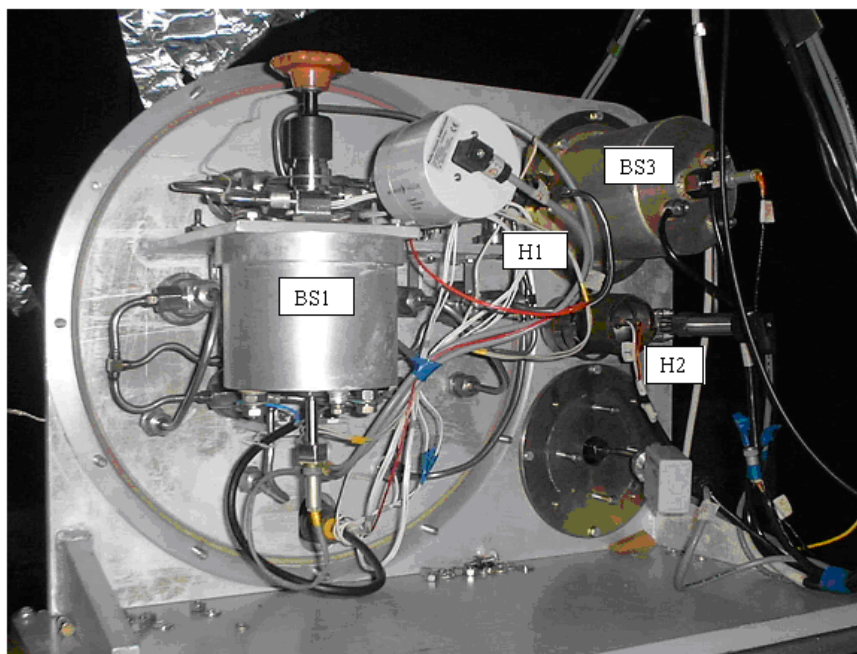


Рис. 6.3. Общий вид СПИВ со снятым колпаком защитного бокса [59]: BS – источники ИВ в комплекте с электронагревателем и термопарой; H – натекатели

При настройке ионного источника требуются потоки ИВ до нескольких $\text{см}^3/\text{час}$. В то же время существуют серьезные ограничения по количеству используемого трития – из-за отсутствия свободного места на циклотроне было невозможно сооружение каких-либо вытяжных шкафов для работы с тритием, а величина наведенной активности в процессе работы циклотрона исключала применение ионизационных камер для детектирования возможных утечек трития. Поэтому было принято решение ограничить количество газообразного трития, используемого в эксперименте, величиной минимально значимой активности (МЗА) по НРБ-99 – 10^9 Бк или $0,01 \text{ см}^3$ при нормальных условиях.

Таким образом, СПИВ при настройке ионного источника должна обеспечивать потоки протия и дейтерия до нескольких $\text{см}^3/\text{час}$, а в рабочем режиме потоки смеси дейтерия (99 %) и трития (1 %) должны регулироваться в пределах $0,01 \pm 0,1 \text{ см}^3/\text{час}$. Реальные потоки не превышали величину $0,01 \text{ см}^3/\text{час}$, что позволяло проводить физические сеансы в течение 100 час.

Для проведения этих же исследований была создана тритиевая мишень и комплекс оборудования [61], 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 [58], что позволило, начиная с декабря 2000 г., проводить систематические исследования экзотических нейтроноизбыточных систем.

Конструктивно комплекс состоит из четырех функционально взаимосвязанных между собой систем (рис. 6.4):

- мишенного блока (МБ), расположенного во внутренней полости реакционной камеры (РК) сепаратора АКУЛИНА [58] 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 (АСКУ), обеспечивающей контроль состояния элементов комплекса, автоматическое поддержание рабочих параметров, ведение протокола эксперимента, графическое и цифровое отображение контролируемых процессов.

Принципиальная схема комплекса представлена на рис. 6.4, общий вид комплекса, установленного на сепараторе АКУЛИНА, – на рис. 6.5. Основное внимание при создании комплекса было уделено обеспечению норм радиационной безопасности при работе с тритием, что и предопределило структуру и конструктивное исполнение элементов комплекса.

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 1 кКи и его транспортировка осуществляются в химически связанном состоянии на ^{238}U в источнике BS3, входящем в состав СН. Равновесное давление для тритида 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.

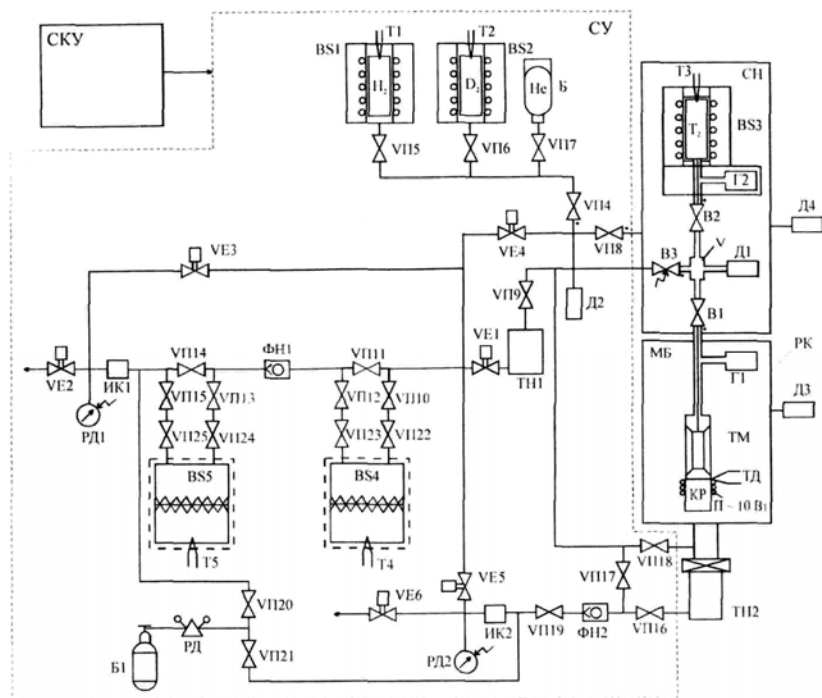


Рис. 6.4. Принципиальная схема комплекса: СКУ – система контроля управления; СН – система наполнения; СУ – система утилизации и контроля радиационной обстановки; МБ – мишенный блок; РК – реакционная камера; BS1(2) – источник протия (дейтерия); BS3 – источник трития; BS4(5) – ловушка; Б Б(1) – баллон 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, VП22-25 – вентили сильфонные вакуумные; VE1-: вентили электромагнитные; V – мерная емкость; Т1-Т5 – термомпара; Г1 (2) – геттер; ТД – термодиод; КР – криорефрижератор COOL POWER 2/10

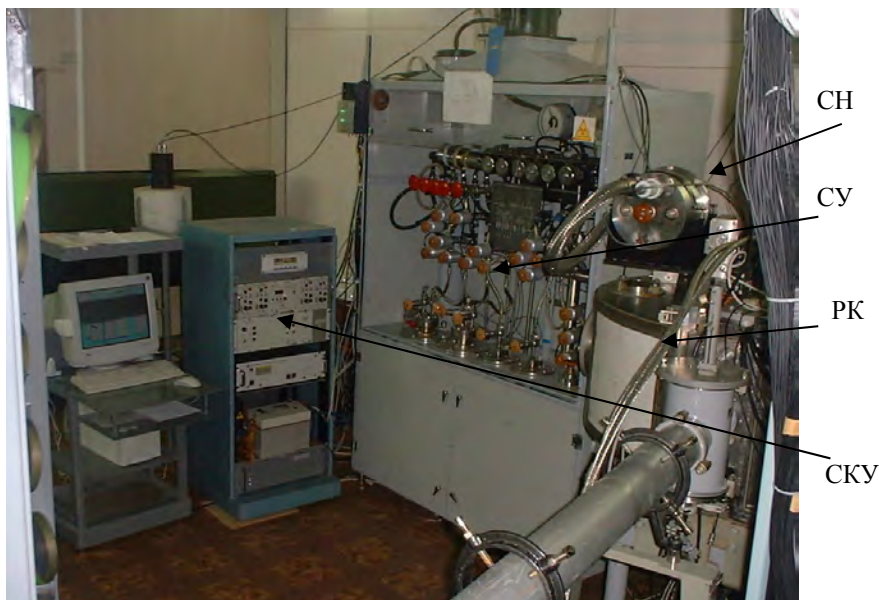


Рис. 6.5. Общий вид комплекса: СКУ – автоматизированная система контроля и управления; СУ – система утилизации и контроля радиационной обстановки; СН – система наполнения; РК – реакционная камера

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 эвакуированном газе концентрации трития, не превышающей 10^{-6} Ки/л.

Схематично мишень изображена на рис. 6.6. 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 рубеж 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 магистралями 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 рубежа 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 рубеже защиты мишени. Количество Тi в геттере выбрано из условия возможности обеспечения полного поглощения газа, находящегося в коммуникациях мишени, СН и в источнике ВS3 (рис. 6.4). Мишень имеет два варианта исполнения. В первом исследуемый изотоп водорода в полости Е (рис. 6.6) 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 У должно быть не более 0,1 МПа. Таким образом, обеспечивается практически 20-кратный запас по прочности мишени.

Хранение изотопов водорода осуществляется на ^{238}U в химически связанном состоянии. Для хранения

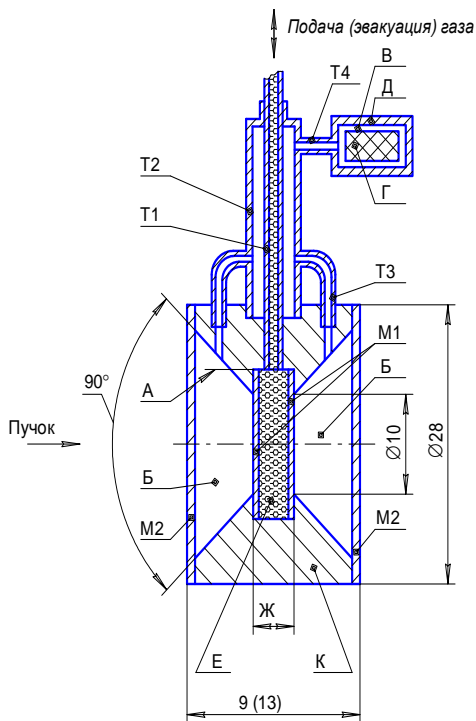


Рис. 6.6. Схематическое изображение мишени: К – корпус; М1 М2 – мембраны; Т1-Т4 – трубки; Е, Б, В – полости; Д – обечайка; Г – геттер

протия и дейтерия используются источники BS1 и BS2, соответственно (рис. 6.4). Источники содержат по 50 г ^{238}U и могут генерировать до 7 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 вакуумированным водородным барьером [47, 48]. Вакуумирование водородного барьера осуществляется с помощью автономного титанового геттера Г2, что позволяет поглощать диффундирующий в процессе нагрева источника тритий.

Источники BS1 и BS2 размещены в вытяжном шкафу СУ (рис. 6.5), 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 откакумированным измерительным объемом V системы наполнения и мишени (рис. 6.4) 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 [62].

Из этих данных следует, что заполнение 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, с другой, что является более существенным, максимально уменьшить количество трития, уходящего в систему утилизации.

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

Утилизация изотопов водорода осуществляется в основном путем «посадки» целевого изотопа на соответствующий источник. Однако в ряде случаев требуется проведение «промывка» и вакуумирования газовых коммуникаций, контактировавших с тритием. В этом случае утилизации 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 осно-

ве 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 O₂, N₂, CO, CO₂, CH₄ 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 [63]. 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.

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. 6.4). 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.

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 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 10⁸ с⁻¹. Пучок был сфокусирован на мишень в пятно диаметром менее 5 мм. Тритиевая мишень и комплекс ее газового обеспечения работали надежно, превышение допустимых норм по объемному содержанию трития в рабочей зоне и вытяжной вентиляции не зафиксировано.

Выводы

Многолетний успешный опыт эксплуатации в различных организациях экспериментальных тритиевых установок показывает, что рассмотренные в данной работе подходы и технические решения, позволяют создавать радиационно-безопасное оборудование для работ с тритием на действующих физических установках с соблюдением нормативной базы РФ. При соблюдении приведенных в работе требований к конструкциям установок и необходимых

мер безопасности они являются надежными и безопасными как для обслуживающего персонала, так и для окружающей среды.

Список литературы

1. Gilbert N. L., Spedding F. H. A Spectroscopic Search for H^3 in Concentrated H^2 . Phys. Rev., v. 43, p. 964 (1933).
2. Oliphant M. L. E., Harteck P., Rutherford E. Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen. Nature, v. 133, p. 413 (1934).
3. Libby W. F. Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation. Phys. Rev. v. 69, p. 671 (1946).
4. Беловодский Л. К., Гаевой В. К., Гришмановский В. Н. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Läser R. Tritium and Helium-3 in Metals. Springer-Verlag Heidelberg, 1989.
6. DOE Handbook. Tritium Handling and Safe Storage. DOE-HDBK-1129-2008.
7. Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 – 09.
9. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10.
10. Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ – РТС – 04). Санитарные правила СП 2.6.1. 05-04.
11. Nagamine K. et al. Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 521–538.
12. Юхимчук А. А., Лобанов В. Н. Система тритиевого обеспечения. Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования. Сб. статей под ред. А. А. Юхимчука. с. 57–62, Саров, 2009 // А. А. Yukhimchuk, V. N. Lobanov. Tritium handling. Hyperfine Interaction. V. 101/102 (661–668) 1996.
13. Yukhimchuk A. A., Lobanov V. N. The approach to the design of a high-pressure tritium facility. J. Moscow Phys. Soc. v. 9, N 4 (1999) 269–280.
14. Caffrey A. J. et al. Muon – Catalyzed Fusion 100 ksi Target Auxiliary Systems Design Philosophy. Report, INEL & LANL, 1990.
15. Caffrey A. J. et al. Muon Catalyzed Fusion, v. 1 (1987) 53–66.
16. Watts K. D. Proceedings 10th Symposium on Fusion Engineering (IEEE/ANS), Philadelphia (1983).
17. Zmeskal J. et al. Muon Catalyzed Fusion, 5/6 (1990/91) 379–385.
18. Carstens D. H. W., David W. R. In. Proc. Miami Int. Symposium on Metal Hydrogen Systems, (1981) 667–674.
19. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. Sources of high – pressure hydrogen isotope gases. J. Moscow Phys. Soc. v. 9, N 4 (1999) 223–230.
20. Golubkov A. N., Kononenko A. A., Yukhimchuk A. A. Vanadium hydride-base thermodesorption sources of hydrogen isotopes. Fusion Science and Technology, 48 (2005) 527–533.

21. Proc. of the RIKEN Symposium on Muon Science, 1993, September 28–29, WAKO, RIKEN, p. 199.
22. Fagaly R. L. High pressure tritium fill system for the OMEGA ICF laser. P.O.Box 85608, San Diego, California 92186-9784 USA.
23. Yukhimchuk A. A., Gaevoy V. K. J of Nuclear Materials, 233–237 (1996) 1193–1197.
24. Baranowski B. Ber. Bunsenges. Physik. Chem., 76, 714 (1972).
25. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Ганчук Н. С. и др. Тритиевая мишень высокого давления. ПТЭ, № 1 (1999) 28–33.
26. Юхимчук А. А., Перевозчиков В. В., Тихонов В. И. и др. Способ получения водорода высокой плотности. Патент № 2163837 С2 Бюл. № 7 10.03.2001.
27. Юхимчук А. А., Тихонов В. И., Демин Д. Л. и др. Способ получения высокой плотности изотопов водорода. Патент № 2174043, Бюл. № 27, 27.09.2001.
28. Справочник. Водород, свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М.: Химия, 1989, с. 477–478.
29. Андреев Б. М., Перевезенцев А. Н. Получение высокочистых инертных газов и водорода. Высокочистые вещества. 2 (1990) 23–39.
30. Клевцов В. Г. и др. Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами. Материаловедение, № 5 (2002) 53–56.
31. Юхимчук А. А. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. ПТЭ, № 6 (1999) 17–23.
32. Purer A., Karlan R. L. Chromatographic separation of the nuclear spin isomers of hydrogen and deuterium below 60 K. J Chromatogr Sci, v. 9, N 1 (1971).
33. Фильчагин С. В. и др. Автоматизация радиохроматографа РХТ-3 для изотопного и молекулярного анализа водородосодержащих газовых смесей. ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез, вып. 2 (2008) 93–96.
34. Jones S. E. et al. Hyperfine Interactions, 101/102 (1996) 695–698.
35. Ganchuk N. S. et al. Calculation and Method for Experimental Evaluation of Molecular Composition in three Hydrogen Isotopes. J. Moscow Phys. Soc. v. 9, N 4 (1999) 281–288.
36. Okuno K. et al. Development of in-situ gas analyzer for hydrogen isotopes in fusion fuel gas processing. Journal of Nuclear Science and Technology. v. 28, N 6 (1991) 509–516.
37. Adar F., Geiger R., Noonan. J. Raman spectroscopy for process/quality control. Applied spectroscopy reviews, v. 32, N 1–2 (1997) 45–101.
38. Schlösser M. et al. How to make Raman-inactive helium visible in Raman spectra of tritium-helium gas mixtures. Fusion Science and Technology, v. 67, N 3 (2015) 559–562.
39. Godot A., Coindet G., Hubinois J. C. Analysis of gases by Raman spectroscopy: determination of isotopic composition of hydrogen mixtures (H_2 , D_2 and T_2). Fusion Science and Technology, v. 60, N 3 (2011) 998–1001.
40. Tikhonov V. V. et al. Investigation of hydrogen isotope exchange reaction rate in mixed gas (H_2 and D_2) at pressure up to 200 MPa using Raman spectroscopy. Fusion Science and Technology, v. 67 (2015) 612–614.

41. Гришечкин С. К., Лобанов В. Н., Юхимчук А. А. Обеспечение безопасности эксплуатации сосудов высокого давления для работы с тритием на этапе их разработки. Сб. докладов «IHISM'04». Саров. 2005. с. 372–380.
42. Bazunov A. V. et al. Physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes. J. Moscow Phys. Soc. 9 (1999) 237–243.
43. Хабаров Ю. А. и др. Исследование физико-механических свойств конструкционных материалов в газовых средах, содержащих изотопы водорода. Сб. докладов «IHISM'01». Саров. 2002. с. 112–118.
44. Бойцов И. Е. и др. Исследование физико-механических свойств жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭП99-ИД в среде газообразного водорода. Сб. статей под ред. А. А. Юхимчука. с. 312–323, Саров, 2009.
45. Maksimkin I. P. et al. Mechanical properties and permeability of hydrogen isotopes through CrNi35WTiAl alloy, containing radiogenic helium. Fusion Science and Technology. 67 (2015) 459–462.
46. Быстрицкий В. М. и др. Исследование проникновения водорода и дейтерия через двойную оболочку (Au + сплав ЭИ698) при высоких температурах и давлениях. ОИЯИ, г. Дубна. Препринт Р13-86-162, 1986.
47. Ganchuk N. S. et al. A radiation-safe container for D-T filling of laser target. J. Moscow Phys. Soc. v. 9 (1999) 289–294.
48. Юхимчук А. А. и др. Сосуд для хранения изотопов водорода. Патент № 2136064, Бюл. № 24, 27.08.99.
49. Demin D. L. et al. // Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 583–589.
50. Demin D. L. et al. // Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 591–597.
51. Графов Н. Н. и др. // Препринт ОИЯИ Р13-97-243. Дубна. 1997.
52. Перевозчиков В. В. и др. Дейтериевая мишень высокого давления. ПТЭ. 4 (2002) 155–160.
53. Юхимчук А. А. и др. Криогенная тритиевая мишень. Сб. докладов «IHISM'04». Саров. 2005. с. 393–400 // Yukhimchuk A. A. et al. Cryogenic tritium target. Fusion Science and Technology, 48 (2005) 294–297.
54. Перевозчиков В. В. и др. Мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза. Сб. докладов Второго международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'04». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005, с. 381–392.
55. Perevozchikov V. V. et al. High-pressure tritium targets for research in muon-catalyzed fusion. Fusion Science and Technology, v. 48(1) (2005) 310–313.
56. Yukhimchuk A. A., Il'kaev R. I. Status of efforts on fundamental and applied studies with tritium at RFNC-VNIIEF. Fusion Science and Technology, 67 (2015) 666–670.
57. Bogdanova L. N. et al. Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in a $p\mu$ System. Physics of Particles and Nuclei Letters. Vol. 9, N 8 (2012) 605–614.
58. Rodin A. M. et al. Status of ACCULINNA beam line. Nucl. Instr. and Meth. B, v. 204 (2003) 114–118.

59. Yukhimchuk A. A. et al. Gas feeding system for the U-400M cyclotron ion source supplying with hydrogen isotopes. *Fusion Science and Technology*, 48 (2005) 704–707.

60. Yukhimchuk A. A. et al. Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei. *Nucl. Instr. and Meth. A*, v. 513. N 3 (2003) 439–447.

61. Юхимчук А. А. и др. Тритиевая мишень для исследования экзотических нейтронноизбыточных ядер и комплекс ее газового обеспечения. ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. вып. 1/2 (2002) 183–190.

62. Маккей К. Водородные соединения металлов. М.: Мир, 1968.

63. Перевезенцев А. Н., Андреев Б. М., Селиваненко И. Л. Глубокая очистка гелия с применением интерметаллических соединений на основе циркония. *Высокочистые вещества*, № 1 (1990) 122–127.