

УДК 62-9:546.11

Научно-экспериментальные комплексы для безопасного обращения с тритием и его соединениями в интересах фундаментальных и прикладных исследований (обзор)

А. А. Юхимчук, Ю. И. Виноградов,
А. Н. Голубков, С. К. Гришечкин,
А. М. Демин, Д. Л. Демин*,
В. В. Перевозчиков, А. М. Родин*,
Г. М. Тер-Акопьян*, В. М. Харитонов

Приводятся основные результаты работ по созданию экспериментальной базы, позволяющей безопасно проводить фундаментальные и прикладные исследования с тритийсодержащими средами в условиях неспециализированных лабораторий. Обсуждаются технические характеристики комплексов оборудования и установок, методические подходы, обеспечившие проведение исследований: явления мюонного катализа ядерных реакций синтеза, свойств легких экзотических ядер на границе нейтронной стабильности; явления «сверхпроницаемости» трития через металлы V группы и проницаемости водорода через конструкционные материалы, в т. ч. содержащие радиогенный ^3He ; взаимодействия конструкционных материалов с изотопами водорода, включая тритий при давлениях до 300 МПа.

Введение

Использование трития для исследований в области фундаментальной и прикладной науки имеет огромное значение. В ряде главных направлений современной науки применение трития и связанных с ним технологий имело определяющее значение для получения результатов высокого мирового уровня. Это относится, например, к работам по измерению массы нейтрино [1], исследованию экзотических ядер с нейтронным гало, представляющим новую форму нейтронной материи [2], и исследованию ядерных реакций синтеза, катализированных мюоном [3], изучению процессов термоядерного синтеза в устройствах магнитного и инерционного удержания и т. д. Одна-

* Объединенный институт ядерных исследований. Московская обл., г. Дубна, ул. Ж. Кюри, 6.

** Доклад на Восьмой Межд. школе молодых ученых и специалистов IHISM-12 Junior им. А. А. Курдюмова, 17–21 сентября 2012 г., т/х «Г. Жуков».

ко широкое применение трития в фундаментальных и прикладных исследованиях сдерживается тем, что он является радиоактивным изотопом водорода (ИВ) и при обращении с ним требуется соблюдение норм радиационной безопасности, что, в свою очередь, связано с созданием специальных лабораторий. Задача осложняется тем, что эти лаборатории должны входить в состав оборудования уже действующих установок (ускорителей, реакторов и т. п.) либо располагаться в помещениях в непосредственной близости к ним. Для решения этой задачи требуется выработка новых подходов и технических решений, позволяющих создать радиационно-безопасное оборудование для работ с тритием с соблюдением действующей нормативной базы. Основываясь на многолетнем опыте работы с тритием в РФЯЦ-ВНИИЭФ, принципиальные решения этой задачи были найдены при создании в 1995–1996 гг. комплекса подготовки газовой смеси (КПГС) [4] и тритиевой мишени высокого давления (ТМВД) [5] для проведения исследований мюонного катализа ядерных реакций синтеза (МКЯРС) и их успешной эксплуатации в составе комплекса ТРИТОН на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ (г. Дубна) в ходе систематических исследований этого явления [6].

Впоследствии эти подходы и решения получили развитие при создании оборудования: для изучения структуры и свойств нейтронно-избыточных ядер на границе нейтронной стабильности [6–9]; для исследований проницаемости и «сверхпроницаемости» металлов изотопами водорода [10, 11]; для исследования совместного влияния ИВ и радиогенного ^3He на свойства конструкционных материалов (КМ) [12] и ряда других исследований.

В данной работе приводится описание разработанных подходов к созданию оборудования, технические решения и базовые элементы оборудования, позволяющие в короткие сроки создавать новые установки и комплексы, а также дано описание вышеобозначенных комплексов и основных полученных на них научных результатов.

Методические подходы и технические решения

В основу создания оборудования, работающего с тритием и содержащими его веществами, положен принцип «разумного» соблюдения действующих в Российской Федерации норм и правил работы с этими веществами и наличия не менее трех рубежей защиты в установках, работающих под давлением, от проникновения трития в атмосферу. Для каждого конкретного случая применялись разные подходы и технические решения, позволяющие работать в рамках действующей законодательной базы. Эти подходы и решения будут приведены по ходу описания конкретных комплексов. Здесь же мы только отметим, что для соблюдения трех рубежей защиты на пути несанкционированного проникновения трития в атмосферу для элементов, работающих под высоким давлением трития, нами был предложен подход, согласно которому первый и второй рубежи защиты обеспечиваются силовым корпусом, состоящим из коаксиально сопряженных сосудов со специально выполненным вакуумируемым барьером между этими сосудами [13, 14]. В итоге был принят ряд технических решений, направленных на минимизацию габаритов установок, и, по сути, создано радиационно-безопасное оборудование для работы в условиях несанкционированных лабораторий.

Комплекс ТРИТОН для исследований МКЯРС

Для проведения систематических исследований явления МКЯРС в широком диапазоне температур, плотностей и концентраций ИВ коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ и Лабораторией ядерных реакций (ЛЯР) им. Г. Н. Флерова ОИЯИ был создан комплекс ТРИТОН. Он включает в себя КПГС см. [4], криогенную установку [15], систему детектирования [16, 17] и сменные мишени – жидкотритиевую (ЖТМ) [18], ТМВД [4, 19, 20] и криогенную тритиевую мишень [21].

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. Общие требования к созданию исследовательских установок высокого давления для работы с тритием активностью выше 10 Ки в условиях, специально не приспособленных для этих целей, приведены в работах [22, 23]. Одним из основных условий при создании КПГС являлось обеспечение радиационной безопасности проводимых 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 давлениях тритийсодержащей среды ниже атмосферного.

Работы по созданию комплекса были начаты в сентябре 1995 г., а в декабре 1996 г., после приемочных испытаний во ВНИИЭФ, комплекс был смонтирован в низкофоновой лаборатории фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Начиная с 1997 г. на комплексе ТРИТОН проводятся систематические исследования процессов МКЯРС в широком диапазоне параметров: состава и плотности смесей ИВ, температур от 20 до 800 К и давлений до 150 МПа.

Конструктивное построение КПГС. Конструктивно КПГС состоит из 10 связанных между собой установок и систем (рис. 1) [4]:

- герметичного бокса, в котором расположены основные функциональные элементы КПГС, 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 форвакуумных 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 КПГС, заполнение герметичных технологических объемов инертным газом и питание газового радиохроматографа газом-носителем;

- системы дозиметрического контроля, обеспечивающей контроль радиационной обстановки в рабочей зоне и уровень трития в технологических коммуникациях;

- электрического пульта, обеспечивающего управление и контроль элементами КПГС и тритиевых мишеней;

- автоматизированной системы контроля и управления, на начальном этапе эксплуатации обеспечивавшей контроль состояния основных элементов КПГС и мишеней, которой в дальнейшем были переданы все функции электрического пульта, кроме управления насосами.

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

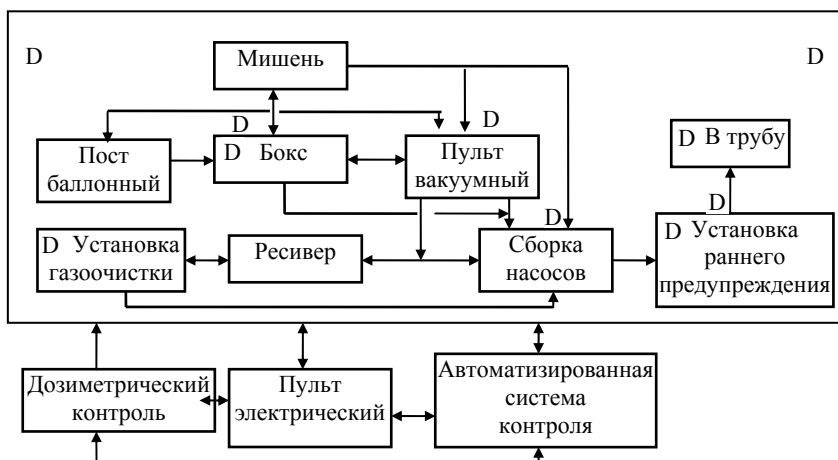


Рис. 1. Блок-схема КППС, D – точка дозиметрического контроля

В основу получения высокого давления в мишенях для исследования процессов МКЯРС положен принцип криогенного заполнения мишеней с последующим их нагревом [24, 25]. При этом в мишенях, в принципе, можно получить давление вплоть до нескольких тысяч атмосфер. С другой стороны, такой способ заполнения мишеней позволяет максимально обезопасить этот процесс и избежать больших потерь рабочего газа в питающих коммуникациях, что очень важно с точки зрения обеспечения экологической нормы (15 кКи) по тритию, принятой для ОИЯИ [26]. При этом довольно просто обеспечить диффузионную очистку рабочего газа до уровня 10^{-7} об. долей по примесям, применяя диффузионные фильтры на основе палладиевых сплавов [27]. Исходя из этих соображений и был разработан КППС. Газовые коммуникации комплекса рассчитаны на рабочее давление 20 МПа (рабочее давление цельнометаллических прогреваемых сильфонных вентилей).

В качестве источников давления в составе КППС используются четыре генератора на основе гидридов металлов, два из них – для длительного хранения и генерации протия и дейтерия. Они содержат по 254 г ванадия марки ВЭЛ-2. Каждый из источников может генерировать до 70 н. л. газа. При этом давление 20 МПа достигается при температуре ~ 140 °С на корпусе генератора. Два других генератора содержат по 210 г ^{238}U и могут генерировать до 29 л газа каждый. Один из них используется для длительного хранения и генерации трития, а другой – для подготовки, оперативного хранения и генерации смесей ИВ заданного состава. Максимальное давление 6 МПа в этих генераторах достигается при температуре на корпусе 650–700 °С. Подробное описание конструкции и принципа работы металлгидридных генераторов приведено далее.

Генераторы нерадиоактивных ИВ размещены в вентилируемой камере под боксом, а генераторы, содержащие тритий, – в выносных отсеках бокса, подстыкованных к его днищу. Причем, выносные отсеки образуют с боксом единый герметичный объем, а место соединения бокса и источников оборудовано водяным холодильником, предотвращающим нагрев среды бокса при работе генераторов.

Очистка изотопов водорода от примесей. Получение чистоты рабочей смеси на уровне 10^{-7} об. долей по примесям в КППС достигнуто за счет применения комплекса мероприятий, таких как:

а) многоступенчатая диффузионная очистка на палладиевых фильтрах [27]. На разных стадиях подготовки рабочей смеси используется три диффузионных палладиевых фильтра;

б) дополнительная очистка на гидридах металлов (V, U);

в) многократная промывка мишени и газовых коммуникаций между мишенью и палладиевым фильтром диффузионно-чистыми ИВ. При этом магистрали прогревались до температуры ~ 200 °С, а ТМВД – до 500 °С;

г) обеспечение вакуумной гигиены.

Подготовка газовой смеси и подача ее в мишень. Подготовка смеси производится путем измерения количества определенного ИВ волюмометрическим методом в калиброванном мерном емкости с помощью датчика «Сапфир» с пределом измерений до 1 МПа.

После измерения необходимого количества заданного ИВ (например, трития) он отправляется в смесевой генератор, где поглощается ураном. Таким же образом отмеряются следующие ИВ приготавливаемой смеси. Мерная емкость состоит из двух калиброванных объемов 1990 и 432 см³. Кроме того, газовые коммуникации между емкостью и датчиком образуют третий калиброванный объем 70 см³. Такой набор калиброванных объемов удобен для подготовки смеси любого изотопного состава.

После накопления смеси в металлгидридном смесевом генераторе может производиться ее гомогенизация. Для этого смесь из генератора выделяется в калиброванную емкость, а затем поглощается обратно ураном источника. Предполагалось, что в процессе гомогенизации мы получим равновесную смесь ИВ, которая при охлаждении и во время эксперимента будет оставаться в этом состоянии. Это обстоятельство важно при обработке результатов экспериментов по МКЯРС. Изучению данного вопроса во ВНИИЭФ был посвящен цикл исследований [28–30], подтвердивший данное предположение.

Подача смеси ИВ осуществлялась через диффузионный палладиевый фильтр в мишень, охлажденную до температуры ~ 20 К.

Контроль молекулярного состава смеси осуществляется радиохроматографом [31, 32], подробное описание которого приведено далее.

Тритиевые мишени. Измерение параметров МКЯРС при высоких температурах и плотностях сопряжено с проведением исследований при высоких давлениях, что, в свою очередь, требует создания специальных мишеней. Наиболее широкими эксплуатационными параметрами по давлению D/T смеси (до 100 МПа) и температуре (от 15 до 800 К) обладали мишени, созданные в LAMPF (Лос-Аламосская установка физики мезонов) [33]. Существенным недостатком этих мишеней являлось отсутствие в их конструкциях технических систем для утилизации диффундирующей из внутренней полости ампулы при высоких давлениях и температурах смеси ИВ, что негативно сказывалось на радиационной безопасности при проведении физических экспериментов. Для реализации исследований процессов МКЯРС при высоких плотностях и температурах в РФЯЦ-ВНИИЭФ созданы две модификации ТМВД, низкотемпературная тритиевая мишень высокого давления (НТМВД) [5, 19, 20] и криогенная тритиевая мишень (КТМ) [21].

Одним из главных требований при создании этой серии мишеней было обеспечение радиационной безопасности их эксплуатации. Для реализации этого требования конструкции всех мишеней выполнены с учетом соблюдения следующих принципов: наличие трех рубежей защиты на пути возможного проникновения ИВ в атмосферу; дублирование запорной арматуры; исполнение ампулы в виде двухслойного автоскрепленного сосуда с вакуумируемой полостью между внутренним и наружным слоями ампулы для сбора диффундирующих ИВ; возможность криогенного и прямого компримирования ИВ; высокая прочностная и функциональная надежность. Далее рассмотрены основные методологические подходы к созданию мишеней высокого давления и их конструктивные исполнения, приведены технические и эксплуатационные характеристики, а также результаты их отработки и эксплуатации.

ТМВД. Для обеспечения исследований процессов МКЯРС при плотностях смесей ИВ, превышающих достигнутые значения в экспериментах с применением мишеней LAMPF, созданы две

модификации ТМВД, обеспечивающие безопасное проведение экспериментов при давлениях смеси до 150 МПа и температурах до 800 К.

Обе модификации ТМВД по своим техническим характеристикам должны были удовлетворять следующим техническим требованиям:

- давление смеси ИВ ≤ 120 МПа (первая модификация); ≤ 150 МПа (вторая модификация);
- температурный диапазон эксплуатации 300–800 К;
- количество КМ на пути мюона и продуктов ядерных реакций должно быть минимально возможным;
- криогенная заправка смеси ИВ;
- радиационная безопасность при активностях трития внутри мишени до 10 кКи;
- ресурс работы – не менее 400 ч для мишени с давлением смеси ИВ до 120 МПа и 200 ч для мишени с давлением смеси ИВ до 150 МПа;
- прочностная надежность ампулы при уровне доверительной вероятности 0,95 должна составлять не менее 0,999999.

ТМВД (рис. 2) представляет собой комплекс устройств, позволяющих сжижать требуемое по условиям эксперимента количество смеси ИВ в ампуле при температуре ~ 20 К с последующим ее нагревом до 800 К. Это позволяет получить давление до 150 МПа при минимальных количествах трития во вспомогательных коммуникациях и обезопасить процесс заполнения мишени. Подача смеси ИВ с уровнем примесей $\leq 10^{-7}$ об. долей и заданного молекулярного состава в мишень и ее эвакуация обеспечивается КППС [4]. Ампула А мишени объемом 16,5 см³ выполнена в виде двухслойного сосуда. Наружный слой является вторым рубежом защиты от диффузионных утечек ИВ и одновременно силовым корпусом ампулы, не подвергающимся пагубному воздействию ИВ [13, 14].

На границе раздела слоев ампулы имеется полость Б, состоящая из набора продольных пазов и цилиндрических канавок. Наличие этой полости позволяет производить охлаждение до криогенных температур смесей ИВ, расположенных во внутреннем объеме ампулы, путем прокачки через эту полость сжиженного водорода. Сжижение водорода обеспечивает блок охлаждения (БО) за счет пропускания через его полости хладагента (жидкого гелия). Подача и прокачка хладагента через БО функционально обеспечивается системой охлаждения, аналогичной описанной в работе [22]. Также через эту полость путем вакуумирования внешней системой, входящей в состав КППС, производится утилизация диффундирующих из внутренней полости ампулы ИВ в процессе проведения экспериментов при высоких давлениях и температурах. На границе раздела слоев сосуда нанесено покрытие из нитрида титана толщиной ≈ 5 мкм, позволяющее предотвратить диффузионную утечку ИВ за пределы второго рубежа защиты [5, 14].

Ампула расположена в герметичном вакуумном кожухе (ВК), что обеспечивает утилизацию ИВ посредством КППС в случаях его проникновения во внутреннюю полость этого кожуха. Таким образом, на пути возможного проникновения ИВ из внутренней полости ампулы в атмосферу в ТМВД конструктивно организовано три рубежа защиты: внутренний корпус ампулы, наружный и корпус вакуумного кожуха.

Для обоснования времени эксплуатации и подтверждения радиационной безопасности первой модификации ТМВД согласно методологии, описанной в работах [34, 35], были проведены разносторонние исследования компонентов, ее составляющих, при этом основное внимание было уделено устройству ампулы мишени, поскольку она является самым критичным элементом с точки зрения обеспечения радиационной безопасности. Эти исследования подтвердили, что конструкция ампулы мишени и примененное в ней техническое решение – сочетание непрерывно вакуумируемого барьера между стенками двухслойной ампулы с нанесением защитного покрытия из нитрида титана на наружную поверхность внутреннего корпуса [13, 14] – позволяют обеспечивать радиационную безопасность мишени при длительной эксплуатации.

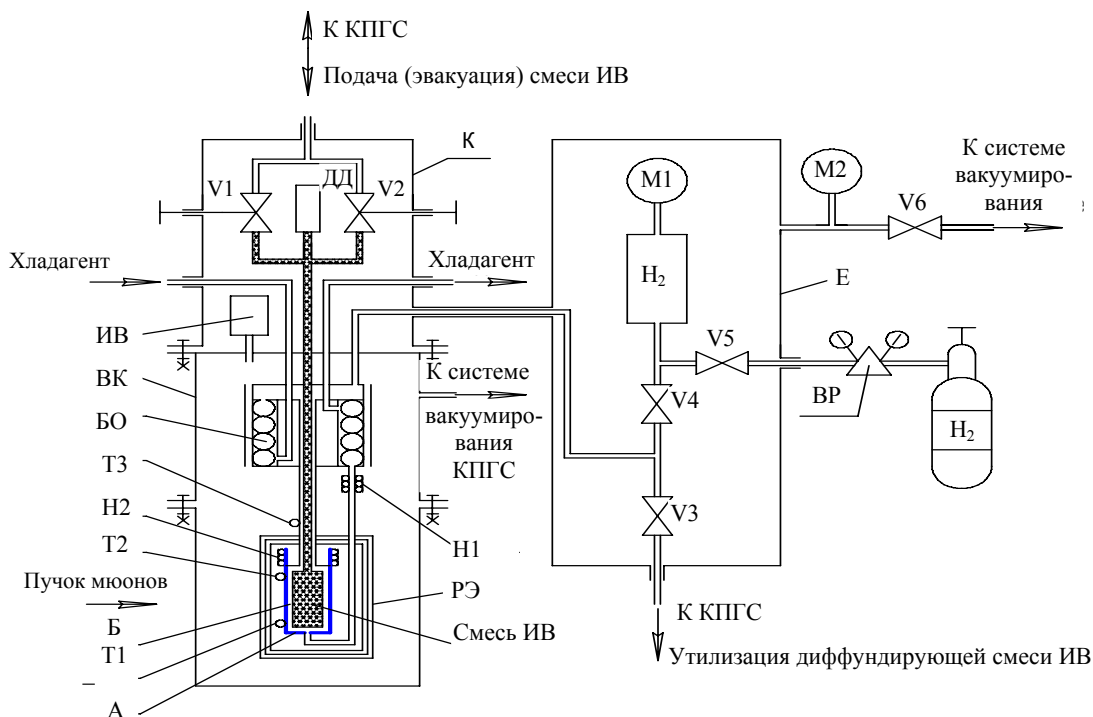


Рис. 2. Принципиальная схема ТМВД: А – ампула; БО – блок охлаждения; ВК – вакуумный кожух; К – колпак; Н1 и Н2 – нагреватели; Т1–Т3 – термопары; ДД(0-250МПа) – тензометрический датчик давления; V1 и V2 – вентили высокого давления; V3–V6 – вентили; ИВ – измеритель вакуума; РЭ – радиационный экран; Е – емкость водородная; ВР – водородный редуктор; M1 и M2 – мановакуумметры

Последующий анализ конструкции ампулы этой модификации ТМВД, включающий в себя расчет на прочность, проведенный путем решения трехмерной задачи теории упругости методом конечных элементов, показал, что после некоторых конструктивных изменений рабочее давление в мишени может быть повышено до 150 МПа. Были проведены ресурсные испытания макетов ампулы мишени, подтвердившие ресурс работы ампулы второй модификации ТМВД в течение предполагаемого срока эксплуатации (200 ч).

С использованием описанной модификации ТМВД на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ была проведена серия экспериментов по исследованию параметров МКЯРС, в процессе которых мишень эксплуатировалась в течение ≈ 200 ч.

По результатам эксплуатации двух модификаций ТМВД получены их следующие технологические параметры: охлаждение ампулы мишени от комнатной температуры до 20 К занимает 2 ч и требует 10 л жидкого гелия; для очистки в КППС и последующего сжижения 16,5 л рабочей смеси требуется 40 мин; нагрев ампулы мишени от 20 до 800 К происходит за 90 мин.

В обеих модификациях ТМВД по их конструктивному устройству не предусматривалось проведение исследований МКЯРС в области температур от 20 до 300 К. Для этого в данной области температур была создана НТМВД [19, 20].

Технические характеристики НТМВД аналогичны техническим характеристикам первой модификации ТМВД, за исключением температурного диапазона эксплуатации – 20–300 К вместо 300–800 К. Заложенные в ее конструкцию технические решения также мало чем отличаются от решений, описанных выше. Исключением является то, что охлаждение мишени осуществлялось гелиевым криорефрижератором, расположенным в донной части ампулы.

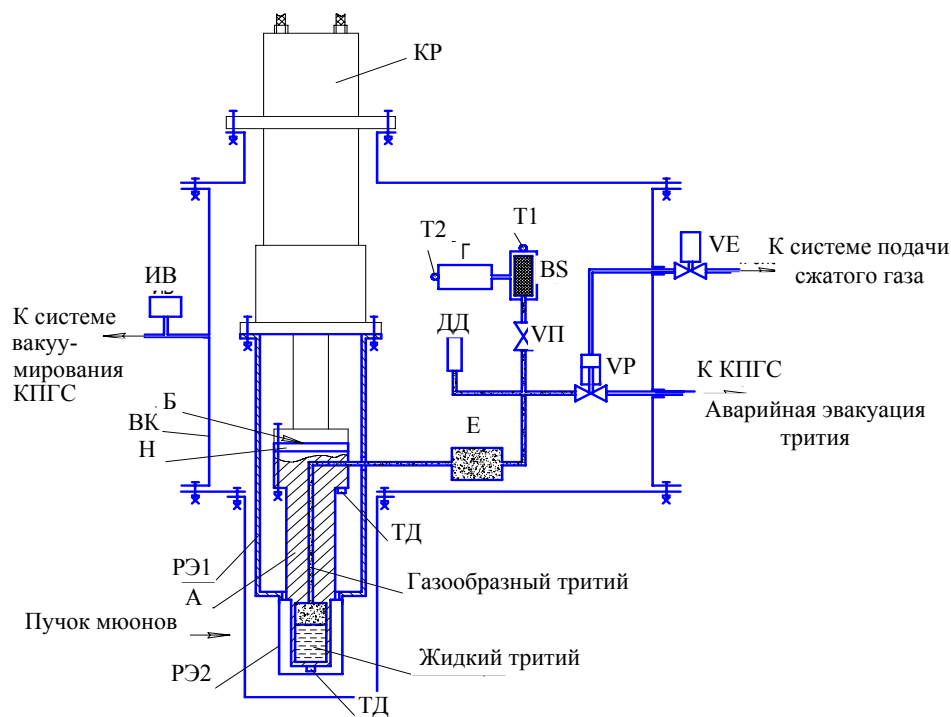


Рис. 3. Принципиальная схема КТМ: А – ампула; ВК – вакуумный кожух; КР – криогенная головка рефрижератора (COOL POWER 4,2GM); ИВ – измеритель вакуума (PKR261); РЭ1 и РЭ2 – радиационные экраны; ТД1 и ТД2 – термодиоды типа D200 19 101 фирмы LEYBOLDAG; Т1 и Т2 – термопары; Н – электронагреватель; Е – буферная емкость; BS – термодесорбционный металлгидридный источник на основе урана; Г – геттер на основе Ti; ДД – пьезометрический датчик давления (APR 266); ВП – вентиль; VP – вентиль с пневмоприводом; VE – клапан электромагнитный (Burkert 6012)

КТМ. Для измерения параметров МКЯРС в жидком тритии с погрешностью менее 10 % и измерения n - n и α - n корреляций в реакции $t\mu t \rightarrow 4\text{He} + n + n + \mu$ была создана КТМ [21]. КТМ представляет собой радиационно-безопасный замкнутый комплекс, который позволяет: хранить тритий в связанном состоянии в виде тритида урана, выделять его перед работой и поглощать после ее окончания, удалять ${}^3\text{He}$ от распада трития из реакционной зоны в процессе проведения исследований, сжимать тритий и поддерживать температурный режим ампулы и источника в процессе эксперимента.

КТМ (рис. 3) имеет следующие технические характеристики:

- диапазон рабочих температур – 6–330 К;
- рабочее давление в газовых коммуникациях (абсолютное) до 0,1 МПа, максимальное до 1 МПа;
- количество трития концентрацией 99,8 % в газообразном состоянии 10 кКи, в связанном 15 кКи;
- рабочий объем ампулы 8,1 см³;
- ресурс работы 250 ч;
- прочностная надежность ампулы не менее 0,999999, при уровне доверительной вероятности 0,95.

КТМ представляет собой комплекс устройств, который обеспечивает проведение следующих операций:

- хранение трития в термодесорбционном металлгидридном источнике BS на основе ^{238}U ;
- генерирование трития из источника BS перед началом и его сорбция по окончании работы;
- поддержание заданной эксплуатационной температуры ампулы мишени и термодесорбционного источника;
- срабатывание предохранительного пневматического клапана, соединяющего газовой коммуникации КТМ и КППС при превышении давления в газовых коммуникациях КТМ более 1 МПа;
- контроль основных параметров КТМ в процессе работы и отображение их в графическом виде на мониторе управляющего компьютера в режиме реального времени.

По своему конструктивному исполнению КТМ принципиально отличается от предыдущих модификаций тритиевых мишеней для исследования процессов МКЯРС. В отличие от этих мишеней, подача рабочего газа в которые осуществлялась от внешнего источника, входящего в состав КППС, данная мишень укомплектована металлгидридным источником трития на основе ^{238}U , который расположен внутри ВК КТМ. Это позволило обеспечить чистоту используемого в эксперименте трития на уровне 99,8 % и, при ограничении максимального количества трития в свободном состоянии, увеличить его долю в ампуле мишени.

В конструкции металлгидридного источника BS предусмотрен геттер Г на основе титана для улавливания трития, диффундирующего в зазор двухслойного корпуса источника при его нагреве. Сорбционная емкость геттера обеспечивает радиационно-безопасную эксплуатацию источника при температуре 450 °С в течение ~7000 ч.

Все радиационно-опасные элементы КТМ – источник трития BS, ампула А, газовая арматура – размещены в ВК. При эксплуатации мишени внутренняя полость кожуха непрерывно вакуумируется вакуумной системой КППС [4] до остаточного давления не выше $5 \cdot 10^{-2}$ Па (контроль по измерителю вакуума ИВ РКР261 с диапазоном измерений $5 \cdot 10^{-7}$ – 10^5 Па).

Для охлаждения мишени используется криорефрижератор (COOL POWER 4,2GM). Криоловка криорефрижератора герметично введена в ВК. Поскольку криорефрижератор работает с постоянной хладопроизводительностью, то регулировка и поддержание необходимой в ходе эксперимента температуры осуществляется электронагревателем Н, установленным между охлаждающей поверхностью Б криоловки и корпусом ампулы. Для улучшения теплопередачи корпус ампулы мишени А и корпус нагревателя Н изготовлены из безкислородной меди. Наружная поверхность корпусов покрыта никелем. В зоне прохождения мюонного пучка стенки ампулы выполнены с минимально возможной, по условиям обеспечения прочностных характеристик, толщиной 0,55 мм. С целью уменьшения тепловых потерь при охлаждении ампула заключена в радиационные экраны РЭ1 и РЭ2. Температура ампулы измеряется двумя термодиодами ТД1 и ТД2.

Давление трития в ампуле и коммуникациях мишени в процессе заполнения ампулы и проведения сеанса исследований параметров МКЯРС не превышает 0,1 МПа. При теплении ампулы в момент перехода трития из жидкого состояния в газообразное давление в коммуникациях резко возрастает, его величина определяется скоростью сорбции трития поглотителем источника. Для сглаживания пиков давления и повышения безопасности эксплуатации КТМ в состав ее газовых коммуникаций введена буферная емкость Е. Кроме этого, в конструкции КТМ предусмотрен автоматический сброс газа в КППС при повышении давления в коммуникациях мишени выше 1 МПа. Для этого коммуникации КТМ соединены с КППС через вентиль с пневмоприводом VP, который открывается электромагнитным клапаном VE по сигналу от датчика ДД.

Контроль параметров КТМ и управление ее элементами осуществляются автоматизированной СКУ (системы контроля и управления). СКУ позволяет: контролировать температуру ампулы мишени с помощью двух термодиодов ТД (см. рис. 3); контролировать температуру источника BS и входящего в его состав геттера Г с помощью термопар Т1 и Т2, соответственно; измерять дав-

ление трития пьезометрическим датчиком давления ДД и остаточное давление в полости ВК с помощью измерителей вакуума ИВ; регулировать температуру источника BS и ампулы мишени А; управлять пневматическим вентилем VP; отображать все измеряемые параметры в режиме реального времени; сохранять все измеряемые параметры для последующей обработки и анализа.

Температура трития во внутренней полости ампулы контролируется ТД (тип D 200 19 707, фирма LEYBOLD AG), обеспечивающим измерение температуры в диапазоне от 2 до 330 К (погрешность измерения ± 1 К в диапазоне 2–100 К и 1 % выше 100 К). При регистрации температуры используется сплайн-описание паспортной температурной характеристики кремниевого термодиода. Применяемая аппаратура и программное обеспечение позволяют стабилизировать температуру ампулы с точностью $\pm 0,05$ К.

Функционирование мишени производится следующим образом. Сначала проводится вакуумирование внешними системами, входящими в состав КППС, ее газовых коммуникаций, а также внутренней полости ее вакуумного кожуха до остаточного давления не более $5 \cdot 10^{-2}$ Па. После выполнения этой операции производится включение питания нагревателя источника BS и внутренняя полость ампулы А заполняется тритием до абсолютного давления 0,1 МПа. Температура источника стабилизируется с помощью СКУ таким образом, чтобы поддерживать равновесное давление трития над тритидом урана, равное 0,1 МПа (~ 420 °С). Затем включается криорефрижератор и начинается процесс охлаждения ампулы. Динамика процесса охлаждения контролируется по показаниям термодиодов ТД1 и ТД2, закрепленных на корпусе ампулы. При определении температуры трития во внутренней полости ампулы мишени принято допущение, что при установившемся статическом режиме температура трития с большой точностью равняется температуре корпуса ампулы. Кроме того, температура ампулы контролируется по давлению насыщенных паров трития в системе. При температуре выдержки 22,2 К образовавшийся в процессе распада трития ^3He удаляется в газовые коммуникации мишени, не накапливаясь в жидком тритии.

После заправки ампулы жидким тритием производится экспозиция мишени мюонным пучком и осуществляется регистрация параметров эксперимента. По окончании эксперимента источник BS охлаждается до комнатной температуры и в него производится эвакуация трития из ампулы мишени.

С использованием КТМ на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведен сеанс продолжительностью 150 ч, во время которого была набрана достаточная статистика для определения параметров МКЯРС в реакции $t\mu t \rightarrow 4\text{He} + 2n + \mu$ при температуре 22,2 К с погрешностью менее 10 %.

Утилизация смеси. Утилизация отработанной смеси осуществляется, в основном, ее посадкой на урановые ловушки с емкостью по водороду 200 л каждая. При этом ловушки могут работать как гидридные насосы-геттеры «тупикового» типа или в «прокачном» режиме. В последнем случае отработанная смесь ИВ прокачивается через активированный уран одной либо обеих ловушек с помощью форвакуумного насоса. ИВ поглощаются ураном, однако различные примеси, содержащие следы трития, все же проходят через урановые ловушки. С целью их улавливания выхлоп форвакуумных насосов осуществляется на отвакуумированный ресивер емкостью 1 м³. После заполнения ресивера до давления ~ 40 –50 кПа с помощью установки газоочистки осуществляется очистка накопленного газа от следов трития. Принцип очистки основан на каталитическом окислении ИВ палладиевым катализатором при температуре 500 °С до воды и улавливании этой воды с помощью цеолитового сорбента. Контроль за качеством очистки осуществляется с помощью ионизационной камеры. После снижения активности трития в очищаемом газе до допустимых норм очищенный газ выбрасывается в вентиляционную трубу. При этом процесс выброса контролируется установкой раннего предупреждения выбросов. В случае превышения допустимых норм газовая смесь с выбросных коммуникаций автоматически отправляется в установку газоочистки на дополнительную очистку.

Энергообеспечение и контроль параметров комплекса. Электропитание всех энергопотребляющих элементов комплекса и контроль за их состоянием (температура, давление, состояние вентилей и клапанов) осуществляется от электрического пульта. В его состав включена немеханическая схема, отражающая состояние вентилей и клапанов. Пульт обеспечивает блокирование более 20 технологических операций, которые в случае ошибочных действий оперативного персонала могут привести к аварийным ситуациям. Например, в случае превышения давления либо температуры на металлургических источниках или ТМВД производится отключение электропитания их нагревательных элементов; при определенных состояниях вентилей блокируется возможность включения насосов, электронагревателей, и т. п.

Контроль за параметрами комплекса и его управление осуществляются автоматизированной системой контроля и управления [36].

Вентиляционная система. Зал низкофоновой лаборатории ЛЯП ОИЯИ, в котором проводились работы с тритием, оборудован общеобменной приточной и вытяжной вентиляцией с десятикратным обменом воздуха в час. Каждая установка КППС размещена в вытяжном шкафу. Шкафы подключены к специальной вытяжной вентиляции с независимым выбросом в трубу, высота которой на 2 м выше корпуса фазотрона. Скорость воздушного потока в открываемых проемах вытяжных шкафов составляет более 1,5 м/с.

Радиационная безопасность. Основное внимание при создании комплекса и в процессе его эксплуатации было уделено радиационной безопасности персонала и окружающей среды.

С точки зрения радиационной безопасности КППС элементы, работающие при повышенных температурах и давлениях тритийсодержащей среды (генераторы, палладиевые фильтры), имеют два рубежа защиты и размещены в герметичном боксе, который является третьим рубежом защиты. В процессе нормальной работы бокс находится под разрежением, величина которого выбирается из расчета, что в случае выхода в бокс всего газа, имеющегося в установке, давление в нем, с учетом температурных колебаний, не превысит атмосферного. В боксе отсутствуют традиционные перчаточные проемы. Управление вентилями осуществляется дистанционно с помощью тяг, которые выведены на переднюю крышку бокса через уплотнительные манжеты.

В качестве радиационных приборов используются: радиометр газов РГБ-06 с блоками детектирования типа БДГБ-02П и блоками сигнализации БСП-19; дозиметр ДРГ2-04 для измерения объемной активности трития в технологическом оборудовании; радиометр газов поисковый РГБЗ-04, предназначен для оперативного обнаружения места утечки радиоактивного газа из технологического оборудования. Кроме того, в процессе работ на комплексе имеется возможность проведения контроля внутреннего облучения персонала с помощью радиометра РЖС-05 с жидким сцинтиллятором.

Ремонтно-монтажные работы с оборудованием, контактировавшим с тритием на комплексе, проводятся в средствах индивидуальной защиты (пневмокостюмы, пневмокуртки) при постоянном дозиметрическом контроле проводимых операций.

К работам на комплексе допущен специально обученный персонал. Перед работой с тритием был проведен полный цикл технологических операций с нерадиоактивными ИВ.

С применением комплекса ТРИТОН проведены всесторонние исследования параметров МКЯРС в смесях D/T и H/D/T /16,37–41,6/, в тритии [42] и дейтерии [43], измерены n - n и α - n корреляций в реакции $t\mu t \rightarrow 4\text{He} + n + n + \mu$ [44], вероятность радиационного канала в реакции $d + d \rightarrow 4\text{He} + \gamma$ [45, 46].

Полученные экспериментальные результаты параметров МКЯРС были использованы при расчетах интенсивного источника 14 МэВ нейтронов на базе мюонного катализа [47], а в сочетании с методологией построения тритиевых систем, использованной в данной работе, позволили предложить принципиальное построение топливного цикла такого источника и рассчитать его параметры [48, 49].

Оборудование для изучения структуры и свойств нейтронно-избыточных ядер на границе нейтронной стабильности

Изучение экзотических ядерных систем, находящихся за пределами нуклонной стабильности, происходит в ряде крупных лабораторий США, Германии, Франции, Японии, ЦЕРН в Швейцарии. В России эти работы проводятся на установке АКУЛИНА [50] в ЛЯР ОИЯИ. Пучки радиоактивных ядер, получаемые на этой установке, имеют энергию 15–45 МэВ/нуклон, что позволяет детально изучать структуру основных и возбужденных состояний экзотических ядер на границе стабильности и за ее пределами. Полнота и надежность получаемых результатов гарантированы тем, что исследуемые ядерные состояния формируются в результате реакций передачи одного–двух нуклонов от хорошо изученных легких мишенных ядер бомбардирующим мишень радиоактивным ядрам ^3H , ^6He , ^8He . В ряду легких мишенных ядер (^1H , ^2H , ^3H , ^3He) особенно важна тритиевая мишень, позволяющая получать новые экзотические ядерные структуры, образующиеся в результате передачи двух нейтронов ядрам ^3H , ^6He , ^8He . Пучки ^6He , ^8He , а также пучки более тяжелых радиоактивных ядер получают на установке АКУЛИНА в реакциях фрагментации ядер стабильных пучков, ускоренных на циклотроне У-400М.

Для проведения этих исследований коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ и ЛЯР ОИЯИ в 1999–2002 гг. были созданы система подачи ИВ в ионный источник циклотрона У-400М, обеспечившая получение в ЛЯР ОИЯИ пучка ядер трития, и серия уникальных тритиевых мишеней.

Система подачи ИВ в ионный источник циклотрона У-400М. Доставка на мишень первичного пучка тритонов, ускоренных на циклотроне У-400М, осуществлялась с помощью сепаратора АКУЛИНА [50]. Требовалось обеспечить ток пучка ионов трития на мишени $\sim 10 \text{ нА}$ ($6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$) при минимально возможном расходе трития и обеспечении чистоты окружающей среды и камеры циклотрона при долговременном режиме работы всей системы.

Для решения этой задачи в РФЯЦ-ВНИИЭФ была создана система подачи в высокочастотный ионный источник (ИИ) циклотрона У-400М ЛЯР ОИЯИ изотопных молекул водорода при заданном соотношении их потоков и концентраций с последующей утилизацией смеси ИВ после завершения работ [7, 51].

Для обеспечения радиационной безопасности количество трития, находящегося в газообразном состоянии, было ограничено величиной минимально значимой активности по НРБ-99 – 10^9 Бк или $\sim 0,01 \text{ см}^3$ при нормальных условиях. Это связано с тем, что в зале циклотрона ЛЯР ОИЯИ существуют ограничения по количеству использу-

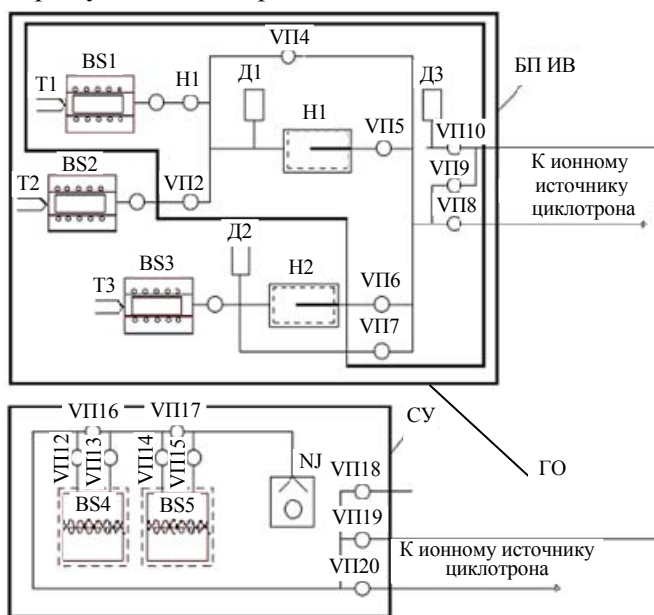


Рис. 4. Принципиальная схема системы подачи ИВ: БП ИВ – блок подачи ИВ; СУ – система утилизации; BS1–BS3 – источники ИВ; BS4, BS5 – поглотители ИВ; Н1, Н2 – натекатели; Д1 – измеритель вакуума (PRK261); Д2 – датчик давления (TRK261); Д3 – датчик давления (CMR261); NJ – насос форвакуумный (BOCEDWARD-SGVSP30); ВП – вентили сильфонные вакуумные; Т1–Т3 – термодары; ГО – герметичный объем

емого трития: из-за отсутствия свободного места на циклотроне было невозможно размещение специальной инфраструктуры для работы с тритием, а радиационные условия, возникающие при работе циклотрона, исключали применение ионизационных камер для контроля возможных утечек трития. Для устойчивой работы циклотрона в рабочем режиме требовались потоки ИВ $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ см³/ч. Вместе с тем, при настройке ионного источника потоки ИВ должны были составлять до нескольких см³/ч. С целью обеспечения радиационной безопасности настройка источника осуществлялась с применением нерадиоактивных ИВ – протия и дейтерия. Принципиальная схема системы подачи (СП) ИВ в ИИ представлена на рис. 4.

Блок подачи (БП) ИВ. БП ИВ обеспечивает подачу изотопных молекул водорода заданного состава в ИИ циклотрона У-400М и тонкую регулировку потоков этих молекул. Система утилизации (СУ) трития предназначена для проведения технологических операций с газовыми коммуникациями БП ИВ и очистки криогенных насосов ИИ циклотрона У-400М. Автоматизированная СКУ обеспечивает 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.

БП ИВ включает в свой состав три термодесорбционных источника – BS1, BS2 и BS3. ИВ в источниках хранятся в химически связанном состоянии на ²³⁸U. Конструктивно все источники выполнены в виде цилиндрических ампул с наружным электрическим нагревателем, содержат по 3 г ²³⁸U и могут генерировать до 380 см³ газа.

Дейтериевый источник BS3 используется при настройке ИИ циклотрона и в рабочем режиме, протий-дейтериевый источник BS2 – при настройке тракта циклотрона и сепаратора АКУЛИНА, а тритиевый источник BS1 – в рабочем режиме при ускорении ионов трития. Источники BS2 и BS3 размещены вне герметичного объема (ГО) БП ИВ (см. рис. 4), а источник BS1 – в ГО системы подачи.

Отличительной особенностью тритиевого источника BS1 является то, что его корпус выполнен в радиационно-безопасном исполнении [13, 14]. Вакуумирование водородного барьера осуществляется с помощью автономного титанового гетера [8, 9]. Конструкция источника BS1 и ГО обеспечивает три рубежа защиты, что позволяет классифицировать источник BS1 как закрытый источник ионизирующего излучения.

Система утилизации. В системе утилизации газа применены поглотители ИВ двух типов – на основе Ti и интерметаллического соединения Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})₂. Первые поглотители 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 перед титановыми поглотителями установлены поглотители с интерметаллидом Zr(V_{0,8}Cr_{0,2})₂, который обладает меньшей сорбционной емкостью, но менее чувствителен к примесям.

Разработанный БП ИВ при настройке ИИ обеспечивает потоки протия и дейтерия до нескольких см³/ч; в рабочем режиме потоки дейтерия и трития регулируются в пределах $5 \cdot 10^{-3-5}$ см³/ч.

Основными элементами БП ИВ, осуществляющими тонкую регулировку потоков газа при их подаче в ИИ циклотрона, являются натекатели оригинальной конструкции Н1 и Н2. Натекатель (рис. 5) конструктивно представляет собой металлическую ампулу с размещенным в ее внутренней полости диффузионным элементом в виде витого никелевого капилляра ($\varnothing 0,45 \times 0,1$ мм). Натекатель работает в режиме диффузионного перетекания ИВ из буферного объема I, заполненного ИВ от металлгидридного источника (В), через стенки капилляра 2 в канал (А), непосредственно связанный с ИИ.

Отсутствие гидридного охрупчивания никеля позволяет получить широкий диапазон регулировки потоков, а относительно низкая, по сравнению с палладиевыми сплавами, удельная водородопроницаемость позволяет получить возможность тонкой регулировки потоков ИВ. Разогрев капилляра осуществляется путем прямого пропускания через него постоянного электрического тока, для чего в конструкции натекателя выполнена соответствующая электроизоляция одного из концов капилляра от корпуса. Низкая водородопроницаемость никеля при комнатных температурах позволяет использовать натекатель, заполненный ИВ, в дежурном режиме. При этом перевод в рабочий режим связан только с разогревом капилляра до рабочих температур, и время этого перевода составляет всего несколько минут. Особенностью натекателя является то, что поток ИВ на выходе из него практически не зависит от давления ИВ, а является функцией величины электрического тока, пропускаемой через капилляр.

Впоследствии конструкция натекателя была модернизирована: предложено малогабаритное устройство напуска, объединяющее в одном корпусе металлогидридный источник ИВ и диффузионный натекатель [52].

СКУ. Структура СКУ и технические решения, использованные при ее разработке, определялись особенностями функционирования, размещения и эксплуатации БП ИВ и СУ на циклотроне У-400М. БП ИВ был установлен непосредственно над ускорителем на изолированной платформе, находящейся под потенциалом 15 кВ. Электронная аппаратура СКУ БП ИВ размещалась в изолированной стойке, находящейся под тем же потенциалом. Для гальванической развязки подсистемы по каналу обмена данными использовалась оптоволоконная линия связи. Энергетическое питание осуществлялось через трансформатор с изоляцией на 30 кВ. Подробнее характеристики и особенности работы СКУ приведены в работе [53].

Система подачи ИВ надежно работала на циклотроне У-400М в серии физических экспериментов. Интенсивность пучка тритонов с энергией 60 МэВ на мишени достигала 10^8 с^{-1} . При длительном (несколько месяцев) ускорении пучка DT^+ расход трития составлял менее 10^8 Бк/час ($1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$).

Комплекс газового обеспечения. Для подачи трития в мишень и его последующей утилизации в РФЯЦ-ВНИИЭФ был разработан и создан комплекс газового обеспечения [8, 9]. Данный комплекс был введен в эксплуатацию на пучке радиоактивных ядер сепаратора АКУЛИНА, работающем на линии первого пучка циклотрона У-400М ЛЯР ОИЯИ. С применением этого комплекса, начиная с декабря 2000 г., проводятся систематические исследования экзотических нейтронно-избыточных ядерных систем.

Конструктивно комплекс состоит из четырех функционально взаимосвязанных между собой систем (рис. 6):

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

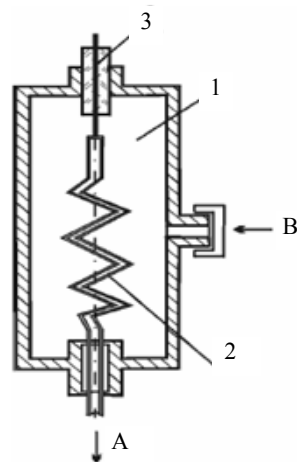


Рис. 5. Схема натекателя: 1 – корпус натекателя, 2 – никелевый капилляр, 3 – электроввод

– автоматизированной СКУ, обеспечивающей контроль состояния элементов комплекса, автоматическое поддержание рабочих параметров, ведение протокола эксперимента, графическое и цифровое отображение контролируемых процессов.

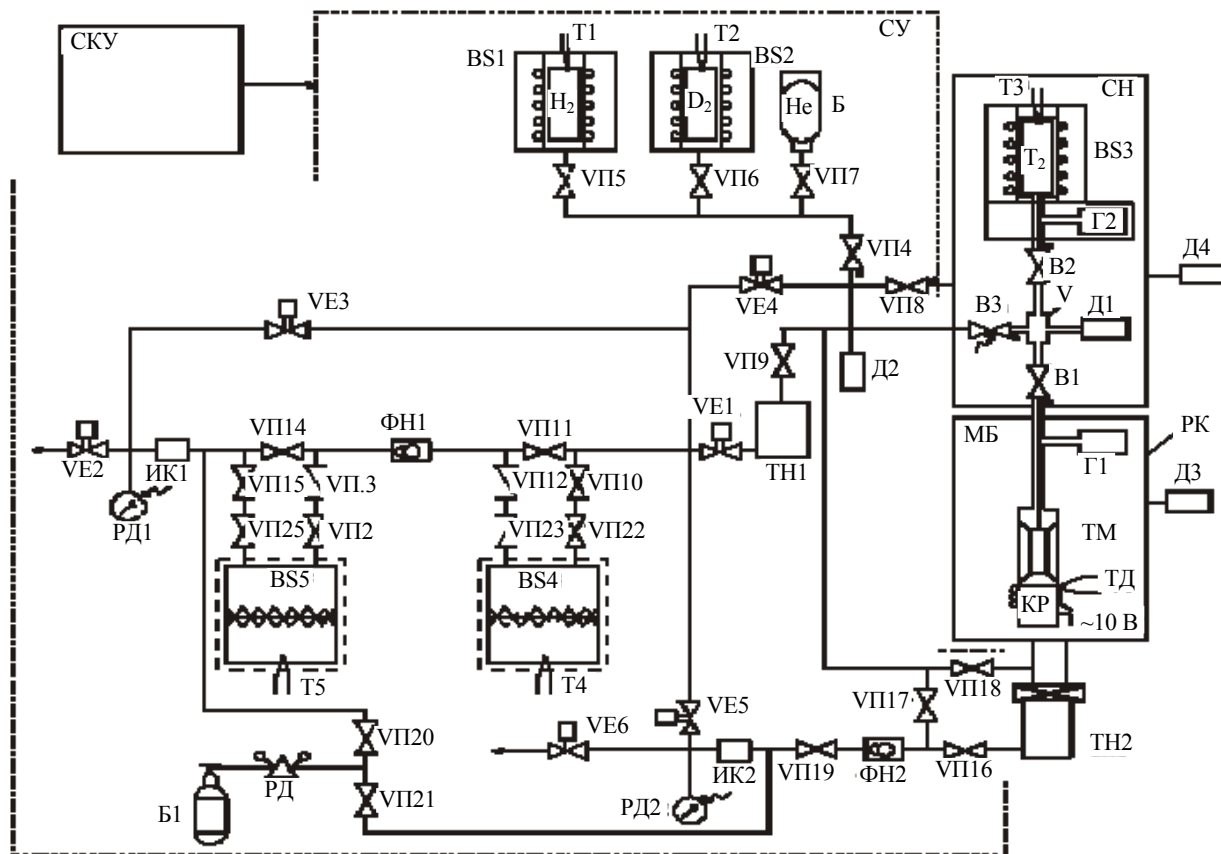


Рис. 6. Принципиальная схема комплекса газового обеспечения: СКУ – система контроля управления; СН – система наполнения; СУ – система утилизации и контроля радиационной обстановки; МБ – мишенный блок; РК – реакционная камера; BS1(2) – источник протия (дейтерия); BS3 – источник трития; BS4(5) – поглотитель ИВ; ББ(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 (BOCEDWARDSGVSP30); ТН1 (2) – насос турбомолекулярный (STP 300M); В1-3, VP22-(25) – вентили сильфонные вакуумные; VE1-6 – вентили электромагнитные; V – мерная емкость; Т1-Т5 – термопара; Г1 (2) – геттер; ТД – термодиод; КР – криорефрижератор COOLPOWER 2/10

Основным элементом комплекса является ТМ, которая представляет собой сосуд с тонкостенными окнами и двумя рубежами защиты. Заполнение мишени тритием осуществляется в РК, являющейся третьим рубежом защиты на пути несанкционированного проникновения трития в окружающую среду.

В собранном виде ТМ и источник трития BS3 представляют собой отдельную герметичную 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.

Источники BS1 и BS2 размещены в вытяжном шкафу СУ (рис. 6), а источник BS3 – в выносном герметичном корпусе СН, размещенном непосредственно на корпусе РК. Такая компоновка вызвана необходимостью сокращения длины газовых коммуникаций между мишенью и СН. Трубопроводы, соединяющие СН с СУ и РК, имеют два рубежа защиты и выполнены по принципу «труба в трубе». При этом внутренний объем наружных труб соединен с вакуумными коммуникациями СУ и РК.

Утилизация ИВ осуществляется путем обратной «посадки» изотопа на соответствующий источник и последующей прокачки через поглотители BS4 и BS5 на основе интерметаллида и титана, соответственно, которые по конструкции аналогичны используемым в системе подачи ИВ в ИИ циклотрона У-400М.

Система радиационного контроля является составной частью СКУ комплекса и обеспечивает измерение объемной активности трития в технологических объемах установки и воздушной среде рабочих помещений. Для измерения объемной активности используются радиометры трития четырехканальные типа РГБ-06-4А и РТА-4, разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Тритиевые мишени для исследований нейтронно-избыточных ядерных систем. Схематично тритиевая мишень изображена на рис. 7.

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 СН. С целью обеспечения радиационной безопасности в устройстве мишени предусмотрен дополнительный рубеж защиты от возможного проникновения трития во внутреннюю полость РК. 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 титан, подготовленный по специальной технологии. Равновесное давление трития над активированным титаном при комнатных температурах составляет не более 10^{-6} Па. Данное техническое решение позволяет предотвратить попадание трития в окружающую среду при любых нарушениях герметичности в первом рубеже защиты мишени. Количество титана в геттере выбрано из условия возможности обеспечения полного поглощения газа, находяще-

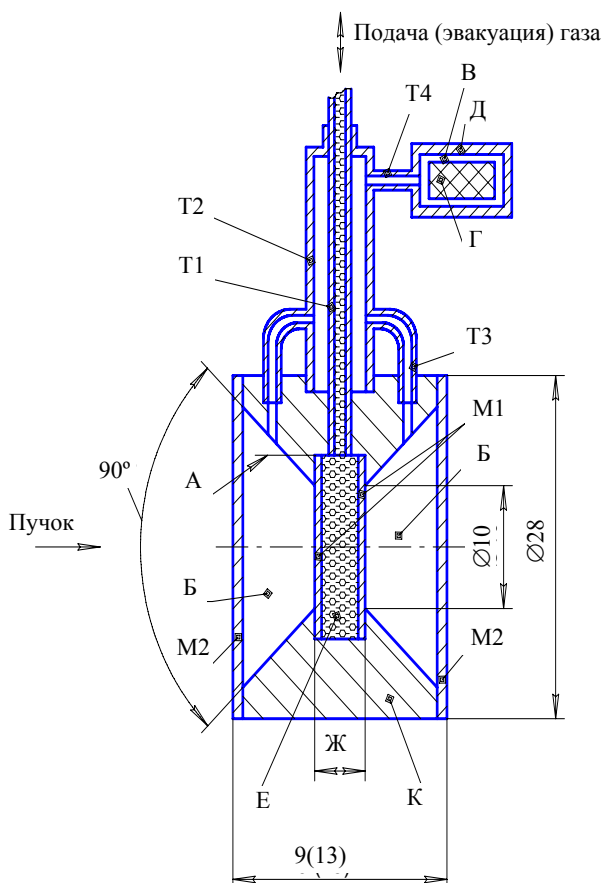


Рис. 7. Схематическое изображение мишени: К – корпус; М1, М2 – мембраны; Т1-Т4 – трубки; Е, Б, В – полости; Д – обечайка; Г – геттер

гося в коммуникациях мишени, СН и в источнике BS3 (см. рис. 6). Мишень имеет два варианта исполнения. В первом исследуемый изотоп водорода в полости Е (см. рис. 7) 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 прочностным расчетам давление разрушения мембран М1 в случае подачи на них давления 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.

Охлаждение мишени до рабочих температур (21–23 К для «жидкой» либо 25–30 К для «газовой») осуществляется криорефрижератором, герметично установленным на корпусе РК. Процесс охлаждения (сжижения) газа в мишени происходит в следующей последовательности. Внутренняя полость РК вакуумируется до давления 10^{-3} – 10^{-4} Па. Далее СН, 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 ТД. Процесс охлаждения газа в мишени до жидкой фазы ($T \sim 21$ К) занимает 70 мин. После достижения требуемой температуры газа в мишени системы охлаждения переводятся в режим термостабилизации, обеспечиваемый регулированием электрических параметров нагревателя. Указанная система обеспечивает поддержание достигнутой эксплуатационной температуры с погрешностью не более $\pm 0,1$ К в течение всего эксперимента.

После завершения сеанса мишень отепляется и газ удаляется в СН. Время отепления мишени ~20 мин.

В цикле экспериментов, проведенных на этом комплексе оборудования, были впервые изучены спектры состояний ультра нейтронно-избыточных ядер водорода и гелия с массовыми числами 4, 5 [54–62] и 8–10 [63, 64], соответственно, и определены свойства этих ядер, имеющие большое значение для развития теории малонуклонных ядерных систем. Были впервые надежно установлены свойства основных и возбужденных состояний ряда ядер, таких как ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^9\text{He}$, ${}^{10}\text{He}$, находящихся за пределами нейтронной стабильности, и получены новые существенные данные, определяющие структуру возбужденных состояний ядра ${}^8\text{He}$, имеющего в структуре, по современным представлениям, ${}^4\text{He}$ кор и гало, образованное четырьмя нейтронами.

Основной резонанс ${}^4\text{H}$ был изучен [65] в реакциях передачи ${}^2\text{H}(t, p){}^4\text{H}$ и ${}^3\text{H}(t, d){}^4\text{H}$ с использованием криогенных жидких мишеней из дейтерия и трития и пучка ядер трития с энергией 58 МэВ. В результате анализа полученных данных были установлены значения главных параметров основного состояния ядра ${}^4\text{H}$: энергия максимума резонанса $E_{\text{рез}} = 3,05 \pm 0,19$ МэВ, наблюдаемая ширина резонанса $\Gamma_{\text{набл}} = 4,18 \pm 1,02$ МэВ. Определен полюс S-матрицы, соответствующий физическим значениям энергии и ширины $E_0 = 1,99 \pm 0,37$ МэВ, $\Gamma_0 = 2,85 \pm 0,3$ МэВ.

Ядерная система ${}^5\text{H}$ была исследована [66] с использованием реакции передачи ${}^3\text{H}(t, p){}^5\text{H}$ при энергии бомбардирующих ядер трития, равной 57,7 МэВ. Исследованием угловых и энергетических корреляций продуктов распада системы ${}^5\text{H}$ установлено, что широкая структура, обнаруженная при энергии более 2,5 МэВ в спектре недостающей массы ${}^5\text{H}$, представляет смесь $3/2^+$ и $5/2^+$ состояний ${}^5\text{H}$. Анализом картин интерференции, полученных в измеренных угловых корреляциях, было определено основное состояние ${}^5\text{H}$, имеющее спин-четность $J\pi = 1/2^+$ энергию $E_{g.s.} \approx 1,8$ МэВ и ширину $\Gamma \approx 1,3$ МэВ.

Получены спектры нижних состояний ядер ${}^8\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$, заселенных в реакциях передачи ${}^6\text{He}(t, {}^8\text{He})p$ и ${}^8\text{He}(t, {}^{10}\text{He})p$, изученных под малыми углами в системе центра масс при энергии

пучков ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He} \sim 25$ МэВ/нуклон [67]. Основное 0^+ состояние ${}^8\text{He}$ и его возбужденные состояния 2^+ , при энергии возбуждения $E^* = 3,6\text{--}3,9$ МэВ, и $(1^+) E^* = 5,3\text{--}5,5$ МэВ, были получены с поперечными сечениями 200, 100–250 и 90–125 мкб/ср, соответственно. Обнаруженная околопороговая аномалия спектра ${}^8\text{He}$ была объяснена заселением 1^- состояния, т. е. мягкой дипольной модой возбуждения, присущей ядру ${}^8\text{He}$, имеющего четырехнейтронное гало. Нижняя по энергии группа событий обнаружена в спектре ${}^{10}\text{He}$ около 3 МэВ над порогом распада ${}^{10}\text{He}$ на ${}^8\text{He} + 2n$. Поперечное сечение реакции ${}^8\text{He}(t, {}^{10}\text{He})p$, заселяющей этот резонанс ${}^{10}\text{He}$, равняется около 140 мкб/ср. Этот результат является подтверждением того, что обнаруженный резонанс является основным состоянием ядра ${}^{10}\text{He}$ со спином-четностью $J\pi = 1/2^-$. Получение основного состояния ${}^{10}\text{He}$ с указанным сечением, измеренным для реакции ${}^8\text{He}(t, {}^{10}\text{He})p$, позволило авторам прийти к заключению, что отсутствие в измеренном спектре ${}^{10}\text{He}$ событий с энергией менее 2,5 МэВ доказывает факт отсутствия s -волнового состояния валентных нейтронов в структуре ядра ${}^{10}\text{He}$.

Установка ПРОМЕТЕЙ для исследований проницаемости и «сверхпроницаемости» металлов ИВ

Актуальность задачи и требования к установке. Ведущие российские научные центры в области исследований проницаемости водорода через металлы (СПбГУ, МГУ, СПбГУТ, МИФИ и др.) не имеют возможности проводить работы с тритием. В то же время ими разработаны новые методики и направления исследований. В СПбГУ разработан метод концентрационных импульсов [68], позволяющий измерять параметры элементарных процессов проницаемости: адсорбционно-десорбционных, диффузии, захвата водорода дефектами и т. п. В СПбГУТ широко исследуется явление «сверхпроницаемости» водорода через металлы V группы, которое заключается в том, что мембраны этих металлов макроскопической толщины могут быть практически такими же «прозрачными» для надтепловых (≥ 1 эВ) водородных частиц, как и отверстия той же площади. Практически весь поток газа, внедряющийся в решетку металла или даже только прилипающий к ее поверхности, проникает сквозь мембрану независимо от ее температуры и толщины [69]. Явление «сверхпроницаемости» интенсивно изучается в различных научных центрах применительно к управлению потоками топливной смеси в термоядерных реакторах, для отделения топлива от продукта термоядерной реакции и организации рециклинга, а также для создания диффузионных мембранных насосов. Практическое использование «сверхпроницаемых» мембран могло бы значительно уменьшить количество трития в топливном цикле, увеличить ресурс крионасосов и привести к выигрышу в отношении безопасности и стоимости термоядерных реакторов.

Основной задачей разработки установки ПРОМЕТЕЙ являлось создание универсальной испытательной базы для исследования явлений проницаемости и «сверхпроницаемости» через металлы всех трех изотопов водорода с использованием самых современных методик. При этом ставилась задача использования единой для решения различных задач технологической базы: откачного и измерительного оборудования, систем подготовки и утилизации газа.

Особое внимание было уделено вопросам обеспечения радиационной безопасности проводимых исследований. Тритий в составе установки хранится в связанном состоянии в виде тритида урана. Установка оснащена двухступенчатой системой утилизации трития на специальные интерметаллидные поглотители.



Рис. 8. Внешний вид установки ПРОМЕТЕЙ

Состав установки. Внешний вид установки ПРОМЕТЕЙ [10, 11] приведен на рис. 8.

Функционально установка может быть условно разделена на две части: первая – для проведения исследований проницаемости ИВ (ячейка 1), вторая – для исследований явления «сверхпроницаемости» ИВ (ячейка 2). Впоследствии функциональные возможности установки были расширены для проведения технологических операций по детритизации образцов КМ, насыщенных ^3He методом «третиевого трюка» [12]. Установка ПРОМЕТЕЙ имеет высокий уровень автоматизации, ее СКУ обеспечивает выполнение всех видов работ – подготовку газовых смесей, регистрацию и архивирование технологических и физических параметров, масс-спектрометрические измерения, радиометрический контроль по тритию, автоматическую блокировку устройств и аварийное оповещение персонала при возникновении радиационной опасности [70].

Исследование проницаемости ИВ. Для исследований проницаемости и диффузии ИВ в металлах и КМ служит ячейка 1. Эксперименты проводятся на образцах плоских мембран толщиной 0,1–1 мм в диапазоне температур 300–750 °С и давлений до $5 \cdot 10^2$ Па для трития и 10^5 Па для протия и дейтерия. С помощью атомизатора создаются импульсы концентрации атомов водорода на входной стороне образца. Парциальное давление продифундировавшего через образец газа на выходной стороне регистрируется квадрупольным масс-спектрометром QMS200 и датчиком с диапазоном измерений от 10^{-6} –1 Па.

Ячейка 1 (рис. 9) включает исследуемую плоскую мембрану 3, которая делит ячейку на входной 1 и выходной 2 объемы, нагреватель 4, обеспечивающий разогрев мембраны до 1000 К, атомизатор 5, измеритель давления 8 и температуры 6. Во входной объем подается рабочее давление ИВ, выходной объем непрерывно вакуумируется насосом и по изменению скорости откачки диффундирующего сквозь мембрану водорода определяются параметры водородопроницаемости материала мембраны.

Корпус ячейки выполнен двухслойным. ИВ, диффундирующие через внутренний корпус ячейки, вакуумируются через систему поглотителей секции утилизации.

На установке выполнены исследования проницаемости трех изотопов водорода через никель (модельный материал) и сталь 12Х18Н10Т [71, 72].

Исследование «сверхпроницаемости» ИВ. Ячейка 2 для исследования «сверхпроницаемости» (рис. 10) включает в себя исследуемую цилиндрическую мембрану ($\varnothing 100$ мм, высота 180 мм, толщина 0,1 мм), атомизатор, систему рециркуляции, измерители давления и температуры. Цилиндрическая мембрана 3 ячейки 2, расположенная вертикально, делит ячейку на входную 1 и выходную 2 стороны. Внутри мембраны размещены атомизаторы, представляющие из себя три группы танталовых пластин, расположенных вдоль мембраны. Каждая группа пластин разогревается в стационарном рабочем режиме до температуры ~ 1800 К, в технологических целях требуется разогрев атомизатора до 2300 К. Температура мембраны измеряется с помощью пирометрических датчиков 7, установленных в специальные окна.

На установке выполнены исследования проницаемости трех изотопов водорода через никель (модельный материал) и сталь 12Х18Н10Т [71, 72].

Исследование «сверхпроницаемости» ИВ. Ячейка 2 для исследования «сверхпроницаемости» (рис. 10) включает в себя исследуемую цилиндрическую мембрану ($\varnothing 100$ мм, высота 180 мм, толщина 0,1 мм), атомизатор, систему рециркуляции, измерители давления и температуры. Цилиндрическая мембрана 3 ячейки 2, расположенная вертикально, делит ячейку на входную 1 и выходную 2 стороны. Внутри мембраны размещены атомизаторы, представляющие из себя три группы танталовых пластин, расположенных вдоль мембраны. Каждая группа пластин разогревается в стационарном рабочем режиме до температуры ~ 1800 К, в технологических целях требуется разогрев атомизатора до 2300 К. Температура мембраны измеряется с помощью пирометрических датчиков 7, установленных в специальные окна.

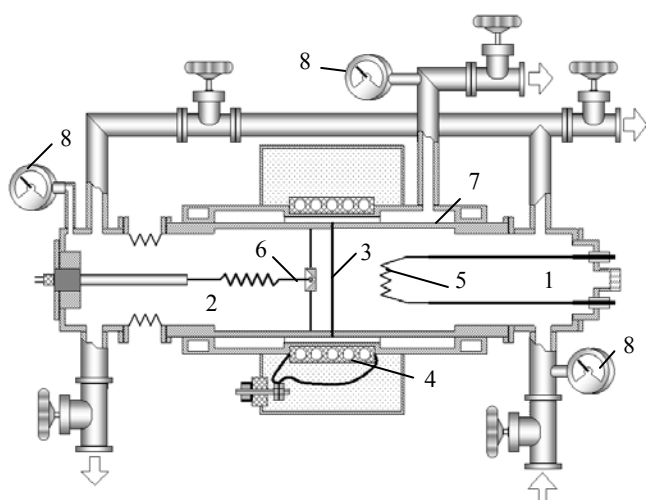


Рис. 9. Ячейка 1 для изучения проницаемости через КМ: 1 – входной объем, 2 – выходной объем, 3 – плоская мембрана, 4 – нагреватель мембраны, 5 – атомизатор, 6 – термомпара, 7 – полость для сбора диффундирующего газа, 8 – датчик давления

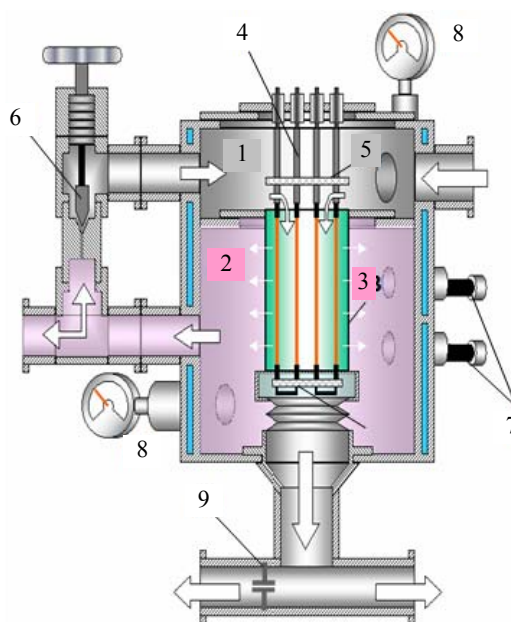


Рис. 10. Ячейка 2 для исследования «сверхпроницаемости» ИВ: 1 – входной объем, 2 – выходной объем, 3 – цилиндрическая мембрана, 4 – атомизатор, 5 – кварцевые диски, 6 – натекатель, 7 – пирометр, 8 – датчик давления, 9 – диафрагма

Через входную сторону 1 ячейки непрерывно прокачиваются ИВ, выходная сторона ячейки (внешняя сторона цилиндра) непрерывно вакуумируется насосом, а проникающий через мембрану газ анализируется с помощью масс-спектрометра QMS200. Рабочее давление в ячейке может составлять от $2 \cdot 10^{-7}$ до 10 Па.

На установке проведен цикл работ по исследованию явления «сверхпроницаемости» ИВ через мембраны из ниобия и ванадия. Измерены параметры «сверхпроницаемости» трех изотопов водорода. При этом параметры для трития получены впервые в мире. Определена скорость мембранной откачки, проведена демонстрация отделения смеси изотопов водорода от ^3He , компрессии и рециркуляции трития с использованием «сверхпроницаемой» мембраны [73–76].

Детритизация образцов конструкционных материалов. Перед исследованиями физико-механических характеристик образцов КМ, насыщенных ^3He методом «тритиевого трюка», они должны быть детритизированы до радиационно-безопасного уровня, установленного Нормами радиационной безопасности НРБ99/2009.

Для проведения детритизации тритированных образцов было разработано и создано оборудование, включенное в состав установки ПРОМЕТЕЙ, позволяющее применять два различных метода детритизации [77, 78] (метод высоковакуумной термодесорбции и метод изотопного замещения), которые обеспечивают извлечение трития из образцов до радиационно-безопасного уровня.

При высоковакуумной термодесорбции тритированные образцы выдерживаются при повышенных температурах и предельно низком остаточном давлении в специально разработанной ячейке, встроенной в высоковакуумную линию установки ПРОМЕТЕЙ. Выделяющийся из образцов газ постоянно откачивается с помощью магниторазрядных насосов. Текущий контроль содержания трития в образцах осуществлялся путем постоянного измерения остаточного давления

газа в ячейке и периодического измерения относительного содержания T2 (шестой массы) с использованием масс-спектрометра QMS200. Критерием достижения радиационно-безопасного содержания трития в образцах являлась величина остаточного давления в ячейке не более $\sim 10^{-5}$ Па и относительное содержание трития в выделяющемся газе не более $\sim 0,5$ при температуре 970 К. Окончательный вывод о завершении данного этапа детритизации образцов осуществляется по результатам прямых измерений содержания трития в КМ. Если оно составляет меньше 10^9 Бк (минимально значащая активность для трития в соответствии с НРБ-99/2009), то образцы используются для запланированных исследований. При превышении содержания трития заданной величины (10^9 Бк) для удаления остаточного трития из образцов применяется метод изотопного замещения.

Метод изотопного замещения основан на замещении трития, растворенного в материале образцов, водородом при выдержках образцов в нагретом состоянии под избыточным давлением водорода в течение определенного времени с последующим вакуумированием образцов. Для реализации этого метода на установке ПРОМЕТЕЙ была создана специальная секция. Детритизируемые образцы помещаются в контейнер, который при комнатной температуре вакуумируется до остаточного давления ~ 1 Па, затем заполняется водородом до давления ~ 5 МПа и нагревается до заданной температуры (как правило, 400–500 °С). После длительной выдержки при этой температуре (максимальное время выдержки составляло ~ 24 ч) газ из контейнера сбрасывается в предварительно откакумированную ионизационную камеру объемом 20 л для измерения количества десорбированного трития, а контейнер с образцами вакуумируется. Затем цикл повторяется. Детритизация образцов методом изотопного замещения продолжается до тех пор, пока объемная концентрация трития в газовой смеси не снижается до фоновых показаний ионизационной камеры. После детритизации измеряется удельное содержание трития в КМ.

Комплекс ПАТРИЦИЯ

Назначение и состав комплекса. Комплекс ПАТРИЦИЯ был разработан и изготовлен для проведения работ, в которых требуется создание давления трития или содержащих тритий смесей до 300 МПа.

Комплекс позволяет проводить длительные (до сотен часов) непрерывные выдержки исследуемых образцов в условиях воздействия высокого давления трития, что позволяет использовать его в работах по изучению равновесных давлений трития над тритидами металлов, насыщению тритием КМ, заполнению Д/Т смесями различного рода мишеней. Необходимость создания комплекса была вызвана, в первую очередь, отсутствием сведений о взаимодействии гидридообразующих и КМ с тритием высокого давления.

Комплекс используется для:

- исследования взаимодействия образцов КМ и гидридообразующих материалов с тритием при давлении до 300 МПа;
- насыщения образцов КМ радиогенным ^3He методом «тритиевого трюка» с целью исследования тритиевой прочности КМ;
- насыщения дейтерий-тритиевой смесью микромишеней, используемых в исследованиях по управляемому лазерному термоядерному синтезу (УЛТС).

Основными элементами установки являются два термодесорбционных металлгидридных генератора на основе гидроксида ванадия [79], служащих, соответственно, источниками T₂ и D₂, и контейнер для исследуемых образцов. Перед проведением работ с тритием высокого давления коммуникации установки испытываются дейтерием из металлгидридного дейтериевого генера-

тора. Этот генератор также может быть использован для приготовления газовой смеси изотопов водорода.

Утилизация тритиевых «хвостов» обеспечивается внешними системами, аналогичными по своему построению приведенным в работе [4].

Исследуемый образец или мишени для УЛТС помещается в контейнер, после чего последний заполняется газом высокого давления. В контейнере может также размещаться диффузионная ячейка для исследования проницаемости КМ. Контейнер рассчитан на рабочее давление до 300 МПа и может вместе с образцом быть нагрет до температуры 873 К.

С помощью мерной емкости и датчиков давления может осуществляться контроль количества газа в установке и отдельных ее частях, производится расчет количества газа, взаимодействовавшего с образцом. Погрешность измерения давления в установке не превышает 0,5 %.

При проектировании комплекса в первую очередь уделялось внимание безопасности работы на нем. Она обеспечивается размещением сосудов давления, газовых коммуникаций и арматуры в герметичном боксе с открывающимся фланцем и смотровыми окнами. Внутренней газовой средой бокса является инертный газ – Аг или Не. В боксе осуществляется непрерывный мониторинг газовой среды на наличие трития. Сброс газовой среды бокса и диффундирующего через корпусы термодесорбционных источников ИВ и контейнера газа осуществляется в отвакуумированный ресивер.

Внешний вид бокса комплекса ПАТРИЦИЯ приведен на рис. 11.

Комплекс снабжен СКУ, обеспечивающей сбор информации о состоянии его узлов и агрегатов (температура, давление, состояние вентилей), обработки регистрируемых данных и анализа получаемых параметров.

С помощью комплекса ПАТРИЦИЯ был проведен ряд работ, основными из которых являются исследование тритиевой прочности КМ и заполнение D/T смесью мишеней для УЛТС.

Обеспечение исследований в области тритиевой прочности КМ. При контакте с тритием КМ корпусных элементов установок и тритиевых мишеней происходит их насыщение тритием и, как следствие, охрупчивание.

Охрупчивание КМ происходит за счет суммарного влияния двух механизмов охрупчивания – водородного охрупчивания КМ и гелиевого охрупчивания КМ, обусловленного накоплением радиогенного гелия ^3He за счет радиоактивного распада растворенного в КМ трития. Методы исследования водородного охрупчивания КМ хорошо известны и им посвящено большое количество работ, в т. ч. и выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ [80, 81]. Гелиевое охрупчивание КМ изучено сравнительно мало, в первую очередь из-за того, что при работе с радиоактивным веществом, каким является тритий, необходимо соблюдать весьма жесткие требования по обеспечению радиационной безопасности. Кроме того, при нормальных условиях из-за малой растворимости трития в КМ в этих условиях и большого периода его полураспада концентрация ^3He , при которой происходят изменения механических свойств КМ, достигается только после очень длительных выдержек.

Концентрация накопленного в КМ ^3He прямо пропорциональна концентрации растворенного в нем трития, которая в металлах меняется с давлением по закону квадратного корня, а с температурой – по экспоненциальному закону. Таким образом, одним из реальных путей накопления в КМ больших количеств ^3He за сравнительно короткий период времени является метод «тритие-

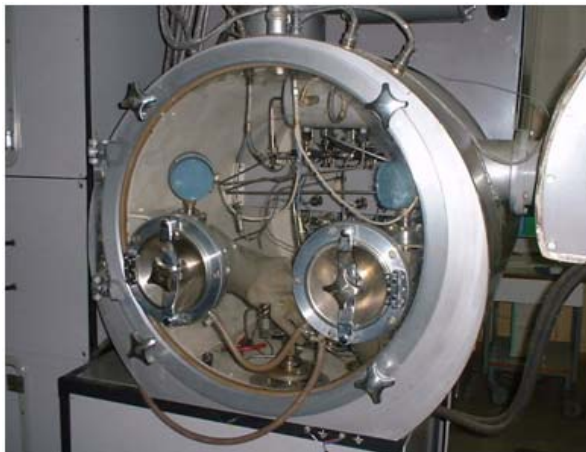


Рис. 11. Внешний вид бокса комплекса ПАТРИЦИЯ

вого трюка», основанный на создании в КМ высокой концентрации трития в результате выдержки исследуемого материала в среде газообразного трития при высоких температурах и давлениях. Например, при повышении температуры образца до 873 К и давления трития до 50 МПа по сравнению с нормальными условиями концентрация растворенного в КМ трития повышается в $\sim 10^4$ раз [82].

С использованием комплекса ПАТРИЦИЯ были проведены работы по насыщению тритием образцов из Ni, стали 12X18H10T, сплавов ХН40МДТЮ-ИД и ХН35ВТЮ-ВД. Были реализованы два возможных подхода к получению образцов, насыщенных ^3He : непрерывная наработка ^3He при выдержке образцов в условиях воздействия высоких давлений и температур (максимальная длительность сеанса составила более 100 ч при давлении трития 50 МПа и температуре образцов 873 К) и насыщение образцов тритием до предельной равновесной концентрации для заданной температуры и давления с последующим быстрым охлаждением образцов до комнатной температуры (наработка ^3He происходила в процессе последующего хранения образцов) [77, 78, 82–84]. С использованием этих образцов впервые проведены комплексные исследования влияния водорода на свойства КМ, содержащих радиогенный ^3He [85–92].

Наполнение дейтерий-тритиевой смесью микромишеней для исследования лазерного термоядерного синтеза. При наполнении микромишеней, используемых для исследований УЛТС, необходимо удерживать плотную D/T смесь при высоких температурах в течение длительного времени.

Минимальное количество трития, используемого в процессе насыщения мишеней, достигается за счет применения в составе установки металлгидридного источника давления на основе ванадия.

Особенностью процесса насыщения тонкостенных стеклянных мишеней является необходимость тонкой регулировки давления ИВ в камере насыщения. С целью сохранения прочности микромишеней при их диффузионном заполнении перепад давления снаружи и внутри микромишени не должен превышать 0,05 МПа в ходе нарастания давления до 50 МПа. Данная задача была решена включением в автоматизированную СКУ комплекса блока автоматики, обеспечивающего измерение температуры металлгидридного источника смеси ИВ, прецизионное измерение давления смеси, управление изменением давления смеси по заданному закону за счет изменения температуры нагрева источника [93, 94].

На способ наполнения микромишеней изотопами водорода получено свидетельство на полезную модель [95]. Примененные комплекс оборудования и технологические решения позволили существенно повысить радиационную безопасность работ по наполнению мишеней для УЛТС D/T смесью, минимизировать количество трития, участвующего в технологическом процессе и свести практически к нулю его потери.

Базовые элементы оборудования

Создание в короткие сроки приведенных в данной работе комплексов и ряда других, о которых мы здесь не упоминаем, стало возможным благодаря ряду типовых решений и разработанному оригинальному базовому оборудованию и приборам. К таким базовым элементам оборудования следует отнести: радиационно-безопасные сосуды высокого давления, датчики давления, вентили и пневмоклапаны высокого давления, металлгидридные генераторы ИВ, дозиметрическое оборудование, автоматизированные системы контроля и управления, и ряд др. В этом разделе мы представим лишь некоторые из них.

Металлогидридные источники ИВ. Для создания высокого давления ИВ необходимо было разработать компактные, радиационно-безопасные термодесорбционные источники ИВ. Одним из лучших материалов для использования в источниках ИВ высокого давления является дигидрид вана-

дия. Он содержит самое большое среди гидридов металлов количество газа, приходящегося на единицу объема гидрида, и этот газ под высоким давлением можно получить при относительно низких температурах, когда КМ еще сохраняют высокие прочностные свойства, а диффузионные утечки ИВ через корпусные детали источников еще малы, что особенно важно для источников трития.

Во ВНИИЭФ удалось создать технологию получения гидрида ванадия с предельным или близким к нему содержанием водорода. Способы получения таких гидридов отражены в патентах [96, 97] и работах [98, 99].

Расчет и безопасная эксплуатация термодесорбционных источников невозможны без знания зависимости создаваемого источником давления от температуры его нагрева. Имеющиеся в литературе данные о температурной зависимости равновесных давлений десорбции ИВ над гидридом ванадия ограничивались областью давлений менее 90 МПа. Нами были получены экспериментальные данные в области давлений до 500 МПа [100–103]. Найденные температурные зависимости равновесных давлений десорбции (создаваемых источниками давлений) использовались при конструировании силовых элементов источников, при расчете прочности корпусов источников и оценке их прочностной надежности.

Для обеспечения безопасности работы источников трития была разработана специальная конструкция силового корпуса (рис. 12), выполненного из жаропрочных водородостойких сплавов, позволяющая осуществлять утилизацию трития, диффундирующего через внутренний корпус двухслойного сосуда давления [13]. С целью повышения безопасности работ каждый из источников снабжен датчиком, соединяющимся с его внутренней полостью для непрерывного контроля давления даже в случае, когда газовые магистрали установки перекрыты.

Полученные результаты и конструктивные решения были использованы при разработке и изготовлении семейства термодесорбционных источников ИВ, используемых в представленных в работе комплексах и установках [4, 7, 8, 10–12]. Основные технические характеристики источников приведены в таблице.

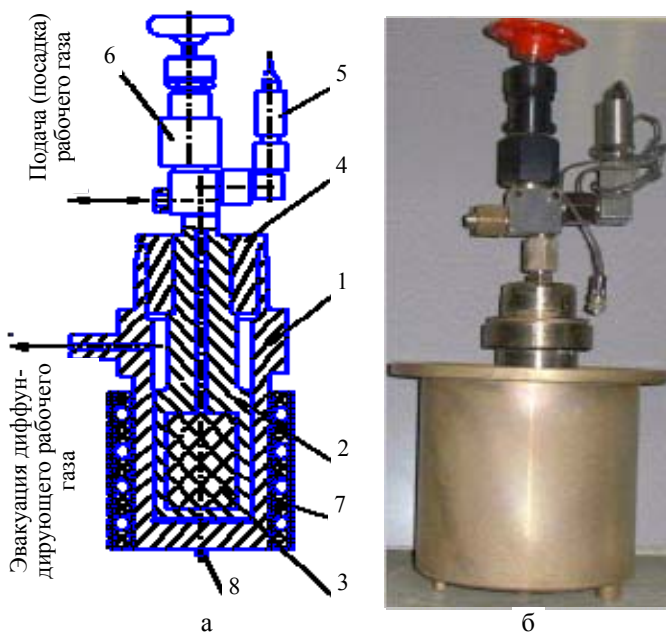


Рис. 12. Схема (а) и общий вид (б) металлгидридного источника высокого давления трития: 1 – наружный корпус, 2 – ампула, 3 – металлгидрид, 4 – крышка, 5 – датчик давления, 6 – вентиль, 7 – электронагреватель, 8 – термопара

Основные технические характеристики металлгидридных источников, используемых в установках

Установка	Рабочее давление, МПа	Емкость по газу, л	Изотоп водорода
КПГС	150	~110	H ₂ , D ₂ , T ₂
ПАТРИЦИЯ	300	70	D ₂ , T ₂
	100	39	D ₂ , T ₂
АКУЛИНА	0,1	0,38	H ₂ , D ₂ , T ₂

Опыт эксплуатации источников (в составе КППС [4] с 1997 г.) показал их высокую надежность. Кроме того, термодесорбционные источники на основе ванадия нашли широкое применение в других областях фундаментальных и прикладных исследований, например, в экспериментах по изучению уравнения состояния ударно-сжатого дейтерия [104].

Радиометры трития. Для безопасного проведения работ на тритиевых комплексах необходимо проводить контроль объемной активности трития как в технологических объемах, так и в воздушной среде рабочих помещений. Единственные выпускавшиеся промышленностью на тот момент радиометры типа РГБ-06 оказались недостаточно надежны. Входящие в их состав блоки преобразования БПН-16П (преобразователь ток–время) часто выходили из строя, особенно при эксплуатации в составе газовых систем установок. Кроме того, тогда эти радиометры не имели средств для их включения в системы автоматизированного управления установок.

По этой причине во ВНИИЭФ были разработаны и сертифицированы два типа автоматизированных радиометров – РГБ-06-4А и РТА-4.

В радиометре трития автоматизированном четырехканальном РГБ-06-4А [105] разработан современный блок регистрации, который позволяет использовать запас имеющихся промышленных блоков преобразования БПН-16П от радиометров РГБ-06 и обеспечивает подключение к компьютеру по интерфейсу RS-485.

Радиометр трития автоматизированный четырехканальный РТА-4 [106] является оригинальной разработкой. Радиометр обеспечивает широкий (шесть порядков) диапазон измерения объемной активности. При этом нижний предел измерений с ионизационными камерами объемом 10 л составляет 10^4 Бк/м³, что достаточно для измерения объемной активности в воздушной среде рабочих помещений.

Такая чувствительность и диапазон достигаются с помощью преобразователя ток–напряжение, который представляет собой высокочувствительный электрометрический усилитель тока с переключением диапазонов (три переключаемых диапазона). Максимальная чувствительность усилителя по входному току составляет $1 \cdot 10^{-14}$ А, при этом преобразователь на основе электрометрического усилителя существенно надежнее преобразователя БПН-16П.



Рис. 13. Внешний вид радиометра РТА-4

Микропроцессорный блок регистрации и управления радиометра РТА-4 обеспечивает регистрацию выходных сигналов четырех усилителей, вычисление токов ионизационных камер по выходным сигналам, управление переключением диапазонов, вычисление объемных активностей трития, управление сигнализаторами. Радиометр может функционировать как автономно (со световой и звуковой сигнализацией об уровне объемной активности в соответствии с заранее заданными порогами), так и на связи с компьютером по двухпроводному интерфейсу RS-485 (на расстоянии до 1200 м). Внешний вид радиометра РТА-4 приведен на рис. 13.

Радиохроматограф. Для анализа изотопного и молекулярного состава газовых смесей, содержащих Н/Д/Т, при проведении работ на комплексе ТРИТОН [4] был разработан автоматизированный радиохроматограф РХТ-2 [31] и его модернизированная версия РХТ-3 [32]. Радиохроматограф зарекомендовал себя как прибор, обеспечивающий надежное и безопасное проведение работ по измерению состава смесей ИВ.

Разделение ИВ в радиохроматографе производится на набивной разделительной колонке длиной 3 м, заполненной Al_2O_3 фракции 120–150 мкм с добавкой 2 % по массе Fe_2O_3 , находящейся при температуре жидкого N_2 . Добавка Fe_2O_3 необходима для уравнивания молекулярного

состава смеси ИВ. Использование разделительной колонны длиной 3 м позволяет целиком разделить все молекулярные формы водорода при времени проведения анализа менее 40 мин. В качестве газа-носителя используется He. Детектирование компонентов газовой смеси осуществляется последовательно детектором по теплопроводности (ДТП) и ионизационной камерой (ИК).

Выход He и различных молекулярных форм водорода из разделительной колонны происходит в последовательности ${}^3\text{He} \rightarrow \text{H}_2 \rightarrow \text{HD} \rightarrow \text{HT} \rightarrow \text{D}_2 \rightarrow \text{DT} \rightarrow \text{T}_2$. С помощью калибровочных экспериментов по чистым газам найдено, что коэффициенты относительной чувствительности ДТП для указанных молекулярных форм водорода равны $\text{KHN/KHD/KHT/KDD/KDT/KTT} = 1,00/0,74/0,59/0,59/0,49/0,39/31/$.

СКУ радиохроматографа РХТ-03 базируется на персональном компьютере и промышленных сертифицированных модулях серии I-7000 фирмы ICP-DAS. Измерение основано на совместной регистрации сигнала с датчика теплопроводности и ионизационного тока, создаваемого β -излучением трития во внутреннем объеме проточной ионизационной камеры. Сигнал с диагонали моста ДТП регистрируется модулем аналогового ввода I-7011_2 с погрешностью 0,05 %.

При работе радиохроматографа с ионизационной камерой используется усилитель с электрометрическим входным каскадом. В усилителе предусмотрено переключение чувствительности по входу, реализуемое при помощи блока управления с оптоэлектронными развязками и модуля цифрового вывода I-7043_1 по командам с компьютера. Шум канала измерения тока ионизационной камеры на самом чувствительном диапазоне усилителя составляет $5 \cdot 10^{-14}$ А, температурный дрейф при этом 0,02 %/град.

Из-за бóльшей чувствительности ионизационной камеры по сравнению с ДТП ее использование в составе радиохроматографа позволяет повысить точность измерений молекул, содержащих тритий. Для этого проводят перенормировку, т. е. коррекцию пиков HT/DT/TT по ионизационной камере.

Для хроматографического анализа на базе пакета CRW-DAQ разработана специальная компьютерная программа, которая обеспечивает управление сбором данных, обработку аппаратурных кривых датчика теплопроводности и ионизационной камеры, расчет молекулярного состава смеси и сохранение как первичных данных, так и конечных результатов анализа. Для расчета состава газовой смеси по пикам датчика теплопроводности и ионизационной камеры предназначен специальный формулятор. Площади пиков катарометра и ионизационной камеры вычисляются автоматически.

Использование СКУ узлами радиохроматографа и программы обработки с удобным интерфейсом на базе персонального компьютера максимально снижает роль оператора и увеличивает производительность, что особенно удобно при проведении рутинных анализов.

Высокая избирательность и большая чувствительность, надежность в работе, в т. ч. и с точки зрения радиационной безопасности, точность и значительная информативность делают этот прибор перспективным для использования в лабораториях, занимающихся работами в области тритиевых технологий.

Автоматизированные системы контроля и управления. Функционирование созданных тритиевых комплексов и проведение на них физических экспериментов осуществляются с применением высокого уровня автоматизации управления и измерений [36, 53, 70, 93, 94, 107]. Системы автоматизации тритиевых комплексов позволяют обеспечивать высокую надежность управления и измерения физических и технологических параметров. Кроме того, для безопасного проведения работ на этих комплексах требуется непрерывный мониторинг объемной активности трития в газовых коммуникациях и воздушной среде рабочих помещений, оповещение персонала при возникновении опасных ситуаций, а также наличие различного типа автоматических блокировок для предотвращения аварийных ситуаций [108].

Для работы автоматизированных систем создан собственный многоцелевой пакет – CRW-DAQ [109]. Он не является жесткой программой, пригодной только для конкретной установки, а скорее средой разработки, совмещенной со средой исполнения. Пакет обеспечивает единую для всех установок графическую среду (предоставляет возможности, необходимые для всех установок, – отображение информации на графиках, в таблицах, организацию активных мнемосхем и т. д.), и снабжен встроенным транслятором языка Pascal. В результате на всех установках работает один и тот же программный пакет, а вся специфика конкретной установки описывается в виде конфигурационных файлов и программ на встроенном языке. Процедура разработки прикладных программ для систем измерения и управления конкретными установками и их сопровождение становятся достаточно простыми и не требуют привлечения программистов высокой квалификации.

Заключение

Предложены и реализованы методические и методологические подходы к работе с тритий-содержащими средами, обеспечившие радиационно-безопасное проведение работ в условиях неспециализированных лабораторий.

Созданы и успешно эксплуатируются уникальные комплексы оборудования для проведения исследований с использованием трития и его соединений в условиях неспециализированных лабораторий.

Практическая ценность работы заключается в получении экспериментальных результатов по характеристикам процессов и явлений, таких как: параметры МКЯРС; свойства и структура нейтронно-избыточных ядер; параметры взаимодействия ИВ с КМ, содержащими радиогенный гелий; параметры проницаемости ИВ через КМ и «сверхпроницаемости» через металлы V группы. Результаты, полученные на созданных комплексах, используются в атомной физике, ядерной физике, физике слабых взаимодействий и квантовой электродинамике, физике твердого тела, применяются при создании оборудования, работающего с тритийсодержащими средами. Микромишени, заполненные DT-смесью, используются в экспериментах по изучению параметров лазерного термоядерного синтеза на установках типа «Искра» в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Созданные в ходе работы базовые элементы оборудования, технические решения, приборы и системы позволяют сократить сроки разработки новых установок и комплексов для фундаментальных и прикладных исследований и широко используются при проведении различных экспериментальных исследований в РФЯЦ-ВНИИЭФ, организациях Росатома, ОИЯИ, СПбГУТ, МГУ, СПбГУ, ЦЕРН и ряде других организаций.

Список литературы

1. Лобашев В. М. Измерения массы нейтрино в бета-распаде трития // Вестник РАН. 2003. Т. 73, № 1.
2. Jonson B. Light dripline nuclei // Physics Reports. 2004. Vol. 389. P. 1–59.
3. Bystritsky V. M. et al. Experimental detection and investigation of muon catalyzed fusion of deuterium and tritium // Phys. Lett. 1980. Vol. B 94. P. 476; Zh. Exp. Teor. Fiz. 1981. Vol. 80. P. 1700; JETP Lett. 1981. Vol. 53. P. 877.
4. Юхимчук А. А., Апасов В. А., Виноградов Ю. И. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 1999. № 6. С. 17–23; Hyperfine Interactions. 1999. Vol. 119. P. 341–344.

5. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Ганчук Н. С. и др. Тритиевая мишень высокого давления // ПТЭ. 1999. № 1. С. 28–33; *Hyperfine Interactions*. 1999. Vol. 119. P. 353–355.
6. Bom V. R., Demin A. M., Demin D. L. et al. Experimental Investigation of Muon-catalyzed dt Fusion in Wide Ranges of D/T Mixture Conditions // *JET Physics*. 2005. Vol. 100, N 4. P. 663–687; *ЖЭТФ*. 2005. 127. Вып. 4. С. 752–779.
7. Yukhimchuk A. A., Angilopov V. V., Apasov V. A. et al. Gas feeding system for the U-400M cyclotron ion source supplying with hydrogen isotopes // *Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 48. P. 704–707; Proc. of «EXON'2004», Singapore, 2005. P. 592–601.
8. Юхимчук А. А., Перевозчиков В. В., Апасов В. А. и др. Тритиевая мишень для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер и комплекс ее газового обеспечения // *ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2002. Вып. 1/2. С. 183–190.
9. Yukhimchuk A. A., Perevozchikov V. V., Apasov V. A. et al. Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2003. Vol. A 513. P. 439–447.
10. Grishechkin S. K., Golubkov A. N., Gornostaev E. V. et al. Device for investigations of tritium retention in and permeation through metals and structural materials // *Hydrogen Recycling at Plasma Facing Materials, NATO Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry*. 2000. Vol. 1. P. 339–348.
11. Yukhimchuk A. A., Grishechkin S. K., Lebedev B. S. et al. «Prometheus» Setup for Study of Tritium Superpermeation // *Fusion Science and Technology*. 2002. Vol. 41. P. 929–933.
12. Boitsov I. E., Grishechkin S. K., Zlatoustovskiy S. V., Yukhimchuk A. A. Modeling of the tritium impact on mechanical properties of structural materials by radiogenic helium and hydrogen synergetic effect technique // *Ibid*. 2005. Vol. 48, N 1. P. 609–612.
13. Пат. 2136064 РФ. МПК6 G21 F9/02. Сосуд для хранения изотопов водорода / А. А. Юхимчук, В. И. Тихонов, С. К. Гришечкин и др. // *Бюл.* № 24. 1999.
14. Ганчук Н. С., Гришечкин С. К., Кононенко А. А. и др. Радиационно безопасный контейнер для наполнения D/T смесью лазерных мишеней // *Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования* / Под ред. А. А. Юхимчука. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 488–493; *Journal of the Moscow Physical Society*. 1999. Vol. 9, N 4. P. 289–294.
15. Demin D. L., Dzhelepov V. P., Grafov N. N. et al. Solid deuterium target // *Hyperfine Interactions*. 1996. Vol. 101/102. P. 583–589.
16. Averin Yu. P., Balin D. V., Bom V. R. et al. Novel method for MCF study in a dense D/T mixture, first experimental results // *Ibid*. 1999. Vol. 118. P. 111–119.
17. Demin D. L., Dzhelepov V. P., Filchenkov V. V. et al. Novel experimental method for the investigation of multiple muon catalysis processes in an H/D/T mixture // *Ibid*. 1996. Vol. 101/102. P. 591–597.
18. Графов Н. Н., Гребинник В. Г., Демин Д. Л. и др. Жидкотритиевая мишень // ПТЭ. 1999. № 1. С. 21–27; *Hyperfine interaction*. 1999. Vol. 119. P. 349–351.
19. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Ганчук Н. С. и др. Тритиевые мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа // *Сб. докладов Международного семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях» (г. Саров, 17–21 мая 1999 г.)*. Саров, 2000. С. 114–119.
20. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Виноградов Ю. И. и др. Мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза // *Сб. докладов Второго Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными матери-*

- лами. ИИISM'04». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 381–392; Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48 (1). P. 310–313.
21. Юхимчук А. А., Тумкин Д. П., Бойцов И. Е. и др. Криогенная тритиевая мишень // Там же. С. 393–400; Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48 (1). P. 294–297.
22. Yukhimchuk A. A., Lobanov V. N. Tritium handling // Hyperfine Interactions. 1996. Vol. 101/102. P. 661–668.
23. Yukhimchuk A. A., Lobanov V. N. The approach to the design of high-pressure tritium facilities // Journal of the Moscow Physical Society. 1999. Vol. 9, N 4. P. 269–280.
24. Пат. 2163837 РФ. Способ получения изотопов водорода высокой плотности / А. А. Юхимчук, Д. Л. Демин, В. Г. Зинов и др. // Бюл. № 24. 1999.
25. Пат. 2174043 РФ. Способ получения высокой плотности изотопов водорода / А. А. Юхимчук, В. И. Тихонов, Д. Л. Демин и др. // Бюл. № 24. 2001.
26. Кочетков О. А., Фомин Г. В., Журавлев В. Ф. и др. Экспертная оценка радиационной безопасности при проведении экспериментов с тритием по мю-катализу в ОИЯИ: Научный отчет ИБФ МЗ РФ, Москва, 1992 г. С. 22.
27. Клевцов В. Г., Лобанов В. Н., Хабаров Ю. А., Юхимчук А. А. Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами // Материаловедение. 2002. № 5. С. 53–56.
28. Крекнин Д. А., Ганчук Н. С., Голубков А. Н. и др. Расчет равновесного молекулярного состава и времени установления равновесия в смеси трех изотопов водорода // Сб. докладов Международного семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях» (г. Саров, 17–21 мая 1999 г.). Саров, 2000. С. 225–238.
29. Ganchuk N. S., Golubkov A. N., Kreknin D. A. et al. Calculation of equilibrium composition and establishing time in a mixture of three hydrogen isotopes // Hyperfine Interactions. 1999. Vol. 119. P. 357–360.
30. Ganchuk N. S., Golubkov A. N., Kreknin D. A. et al. Calculation and methods for experimental evaluation of molecular composition in a mix three hydrogen isotopes // Journal of the Moscow Physical Society. 1999. Vol. 9, N 4. P. 281–288.
31. Виноградов Ю. И., Голубков А. Н., Ширнин П. В. и др. Количественный анализ изотопов водорода газовым хроматографом РХТ-2: Препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ № 83. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
32. Фильчагин С. В., Бучирин А. В., Виноградов Ю. И. и др. Автоматизация радиохроматографа РХТ-3 для изотопного и молекулярного анализа водородосодержащих газовых смесей // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 93–96.
33. Watts K. D., Jones S. E., Caffrey A. J. Develment of target capsules for Muon Catalyzed Fusion experiments // Proc. 10th Symposium on Fusion Engineering (IEEE/ANS), Philadelphia, 1983. P. 1143–1147.
34. Бойцов И. Е., Ганчук Н. С., Гришечкин С. К. и др. Разработка сосудов высокого давления изотопов водорода // Сб. докладов Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. ИИISM'01». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 256–262.
35. Гришечкин С. К., Лобанов В. Н., Юхимчук А. А. Обеспечение безопасности эксплуатации сосудов высокого давления для работ с тритием на этапе их разработки // Сб. докладов Второго Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. ИИISM'04». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 372–380; Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 11. С. 340–349.

36. Виноградов Ю. И., Курякин А. В. и др. Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 2004. № 1. С. 1–13.
37. Bom V. R., Bradbury J. N., Davies J. D. et al. Temperature and density dependence of μ -catalysis cycling in dense D/T and H/D/T gas mixtures // *Hyperfine Interactions*. 1999. Vol. 118. P. 103–109.
38. Bom V. R., Bradbury J. N., Davies J. D. et al. Investigation of the parameters of muon-catalyzed fusion in double D/T mixture at high temperature and density // *Ibid.* 2001. Vol. 138. P. 213–223.
39. Averin Yu. P., Bom V. R., Demin A. M. et al. Experimental results on muon catalyzed dt fusion in H/D/T mixture // *Ibid.* P. 249–253.
40. Filchenkov V. V., Grafov N. N. Effective muon losses in the muon catalyzed fusion cycle in a double D/T mixture at high temperature and density // *Ibid.* P. 241–244.
41. Demin D. L., Filchenkov V. V., Grafov N. N. et al. The investigation of the dependence of the parameters of muon catalyzed fusion on the protium concentration in triple H/D/T mixture at high temperature and density // *Communication JINR, E15-2000-156, Dubna, 2000.*
42. Demin D. L., Filchenkov V. V., Grafov N. N. et al. On the experimental investigation of muon catalyzed t + t fusion // *Ibid.* E15-2003-199, Dubna, 2003.
43. Bom V. R., Bradbury J. N., Demin D. L. et al. Measurement of the temperature dependence of the $dd\mu$ -molecule formation rate in dense deuterium at 300–800 K // *Hyperfine Interactions*. 2001. Vol. 138. P. 313–319.
44. Bogdanova L. N., Bom V. R., Demin A. M. et al. Experimental Investigation of Muon-catalyzed t + t Fusion // *JETP*. 2009. Vol. 108, N 2. P. 216–225.
45. Богданова Л. Н., Бом В. Р., Демин Д. Л. и др. Поиск реакции радиационного захвата $d + d \rightarrow 4\text{He} + \gamma$ из состояния мюонной молекулы $dd\mu$ // *ЯФ*. 2002. Вып. 65, № 10. С. 1826–1832.
46. Балувев В. В., Богданова Л. Н., Бом В. Р. И др. Экспериментальное исследование радиоактивного захвата в реакции $d + d \rightarrow 4\text{He} + \gamma$ из состояния $J = 1$ мюонной молекулы $dd\mu$ // *ЖЭТФ. Сер. Термоядерный синтез*. Т. 139. Вып. 6. С. 1–7.
47. Анисимов В. В., Архангельский В. А., Кавалери Е. и др. Интенсивный источник 14 МэВ нейтронов на базе мюонного катализа ядерных реакций синтеза (МК ИИН) // *Сб. «Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования» / Под ред. А. А. Юхимчука. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 166–172; Fusion Technology*. 2001. Vol. 39, N 2. P. 98–2008.
48. Юхимчук А. А., Архангельский В. А. Тритиевый топливный цикл МК ИИН // *Сб. докладов Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'01»*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 85–92.
49. Yukhimchuk A. A., Arkhangel'sky V. A. Tritium Fuel Cycle for Muon-Catalyzed Intense Neutron Source (MC INS) // *Hyperfine Interactions*. 2001. Vol. 138. P. 409–415; *Fusion Science and Technology*. 2002. Vol. 41. P. 826–830.
50. Rodin A. M., Sidorchuk S. I., Stepanov S. V. et al. High resolution line of the U400M cyclotron and a possibility of RIB accumulation and cooling in the K4 ring // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 1997. Vol. A 391. P. 228.
51. Юхимчук А. А., Ангилопов В. В., Апасов В. А. и др. Система подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М // *Сб. докладов Второго Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'04»*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 401–410.

52. Пат. 2234973С2 РФ. Устройство для подачи водорода в приемник (варианты) / А. А. Юхимчук, А. Н. Голубков, С. В. Златоустовский и др. // Бюл. № 24, 2004.
53. Виноградов Ю. И., Арюткин В. С., Курякин А. В. и др. Система контроля и управления комплекса тритиевой мишени для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 1/2. С. 197–200.
54. Oganessian Yu. Ts., Ter-Akopian G. M., Bogdanov D. D. et al. Hydrogen-4 and hydrogen-5 from transfer reactions induced by a 57.5 MeV triton beam on deuterium and tritium targets // Proc. of the Int. Conf. Nuclear Physics at Border Lines, Lipari (Messina), Italy, 21–24 May 2001. P. 372–375.
55. Golovkov M. S., Oganessian Yu. Ts., Ter-Akopian G. M. Super-Heavy hydrogen isotopes studied with 58-MeV triton beam // Coll. of reports of International Symposium on Exotic Nuclei. Lake Baikal, Russia, July 24–28, 2001. P. 334–346.
56. Оганесян Ю. Ц., Тер-Акопян Г. М., Богданов Д. Д. и др. Изучение структуры ультранейтронно-избыточных ядер водорода и гелия с использованием реакций радиоактивных пучков на тритиевой мишени // Известия Академии наук. Сер. Физическая. 2002. Т. 66, № 5. С. 619–624.
57. Golovkov M. S., Oganessian Yu. Ts., Bogdanov D. D. et al. Evidence for resonance states 5H // Physics Letters B. 2003. Vol. 556. P. 70–75.
58. Тер-Акопян Г. М. и др. Сверхтяжелые ядра водорода, полученные в реакциях передачи с экзотическими пучками // ЯФ. 2003. Т. 66. С. 1587.
59. Sidorchuk S. I., Golovkov M. S., Oganessian Yu. Ts. Experimental study of the hydrogen isotopes beyond the drip-line $4,5\text{H}$ // Coll. of reports of International Symposium on Exotic Nuclei. Petergof, Russia, July 5–12, 2004. P. 45–51.
60. Golovkov M. S., Grigorenko L. V., Fomichev A. S. et al. Observation of Excited States in 5H // Physical Review Letters. 2004. Vol. 93. P. 262501.
61. Golovkov M. S., Grigorenko L. V., Fomichev A. S. et al. Correlation studies of the 5H spectrum // Physical Review C. 2005. P. 064612.
62. Sidorchuk S. I. et al. Resonance state of hydrogen nuclei 4H and 5H obtained in transfer reaction with exotic beams // Nuclear Physics. 2003. Vol. A 719. P. 229.
63. Grigorenko L. V., Golovkov M. S., Ter-Akopian G. M. et al. Soft Dipole Mode in ^8He // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2009. Vol. 6, N 2. P. 118–125.
64. Golovkov M. S., Grigorenko L. V., Ter-Akopian G. M. et al. The ^8He and ^{10}He spectra studied in the (t, p) reaction // Physics Letters. 2009. Vol. B 672. P. 22–29.
65. Sidorchuk S. I., Bogdanov D. D., Fomichev A. S. et al. Experimental study of ^4H in the reactions $^2\text{H}(t, p)$ and $^2\text{H}(t, d)$ // Ibid. 2004. Vol. B 594. P. 54–60.
66. Golovkov M. S., Grigorenko L. V., Fomichev A. S. et al. Correlation studies of the ^5H spectrum // Phys. Rev. 2005. Vol. C 72. P. 064612.
67. Fomichev A. S., Grigorenko L. V., Golovkov M. S. et al. Properties of very n -rich He isotopes // Eur. Phys. J. 2009. Vol. A 42. P. 465–469.
68. Gabis I. E. The method of concentration pulses for studying hydrogen transport in solids // J. Tech. Physics. 1999. Vol. 44, N 1. P. 90–95.
69. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A. Physico-chemical origin of superpermeability – large-scale effects of surface chemistry on «hot» hydrogen permeation and absorption in metals // J. Nucl. Mater. 1990, N 170. P. 79–94.

70. Виноградов Ю. И., Курякин А. В., Арюткин В. С. и др. Автоматизированная система контроля, управления и сбора данных стенда «Прометей» // *Материаловедение*. 2002. № 1. С. 46–50.
71. Денисов Е. А., Курдюмов А. А., Компаниец Т. Н. и др. Водородопроницаемость стали 12Х18Н10Т, содержащей радиоактивный гелий // *Сб. докладов Третьей Международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'07»*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 126–132.
72. Мусяев Р. К., Лебедев Б. С., Буснюк А. А. и др. Исследования явлений проницаемости и сверхпроницаемости металлов на установке «Прометей» // *Материаловедение*. 2002. Вып. 6. С. 45–48.
73. Musyaev R. K., Lebedev B. S., Grischechkin S. K. et al. Tritium supermeability: experimental investigation and simulation of tritium recirculation in «PROMETHEUS» setup // *Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 48, N 1. P. 35–38.
74. Musyaev R. K., Yukhimchuk A. A., Lebedev B. S. et al. Study of hydrogen isotopes superpermeation through vanadium membrane on «PROMETHEUS» setup // *Ibid.* 2008. Vol. 54. N 2. P. 523–525.
75. Мусяев Р. К., Лебедев Б. С., Юхимчук А. А. и др. Исследование явления сверхпроницаемости изотопов водорода через ванадиевую мембрану на установке «ПРОМЕТЕЙ» // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2008. № 2. С. 26–31.
76. Musyaev R. K., Yukhimchuk A. A., Lebedev B. S. et al. Studies of hydrogen isotopes superpermeation through membranes of group V metals on «PROMETHEUS» setup // *Proc. of the 2008 Int. Hydr. Conf. ASM International*. 2009. P. 735–742.
77. Малков И. Л., Клевцов В. Г., Юхимчук А. А. Применение метода «тритиевого трюка» для ускоренного накопления гелия-3 в конструкционных материалах // *Материаловедение*. 2002. Вып. 5. С. 34–37.
78. Малков И. Л., Гришечкин С. К., Златоустовский С. В. и др. Получение образцов, содержащих ^3He , для исследования физико-механических свойств конструкционных материалов // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2008. Вып. 2. С. 72–79.
79. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A., Kononenko A. A. Thermodesorption of Vanadium // *Based Hydrogen Isotope Sources // Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 48, N 1. P. 527–533.
80. Voitsov I. E., Grischechkin S. K., Malkov I. L. et al. Physical and mechanical characteristics of EP741 and EP99 high-temperature nickel alloys in high-pressure hydrogen gas // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1999. Vol. 24. P. 919–926.
81. Бойцов И. Е., Балувев В. В., Гришечкин С. К. и др. Исследование влияния водорода высокого давления на механические свойства некоторых нержавеющей сталей в диапазоне температур от минус 800 °С до комнатной // *Сб. докладов Третьей Международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'07»*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 302–308.
82. Златоустовский С. В., Клевцов В. Г., Малков И. Л. и др. Метод создания повышенной концентрации трития в конструкционных материалах // *Сборник докладов Международного семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях»*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 39–42.
83. Malkov I. L., Yukhimchuk A. A., Zlatoustovskiy S. V. Calculated and experimental study of metal saturation with helium-3 // *Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 5, N 1. P. 613–616.
84. Денисов Е. А., Курдюмов А. А., Компаниец Т. Н. и др. Взаимодействие водорода со сталью 12Х18Н10Т, содержащей радиоактивный гелий // *Сб. докладов Третьей Международной конферен-*

ции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'07». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 283–291.

85. Denisov E. A., Kanashenko S. L., Causey R. et al. Effect of radiogenic helium on stainless steel 12Cr18Ni10Ti structural changes and hydrogen sorption // *Fusion Science and technology*. 2008. Vol. 54, N 2. P. 493–496.

86. Boitsov I. E., Kanashenko S. L., Causey R. et al. Effect of radiogenic helium on stainless steel 12Cr18Ni10Ti mechanical properties and hydrogen permeability // *Ibid.* P. 497–500.

87. Бойцов И. Е., Гришечкин С. К., Юхимчук А. А. и др. Влияние радиогенного ^3He и водорода на механические свойства и структуру стали 12X18H10T // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 50–55.

88. Денисов Е. А., Курдюмов А. А., Компаниец Т. Н. и др. Водород и радиогенный гелий в стали 12X10H10T // Там же. С. 56–65.

89. Канашенко С. Л., Городецкий А. Е., Захаров А. П. и др. Исследование структуры нержавеющей стали 12X18H10T, содержащей радиогенный гелий // Там же. С. 66–72.

90. Бойцов И. Е., Гришечкин С. К., Glugla M. и др. Механические свойства стали 12X18H10T, содержащей до 250 атм радиогенного ^3He // Сб. материалов XIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», г. Нижний Новгород, 01–05 июля 2008 г. С. 105–107.

91. Denisov E., Kanashenko S., Causey R. et al. Effect of radiogenic helium on stainless steel 12Cr18Ni10Ti structural changes and hydrogen sorption // *Fusion Science and Technology*. 2008. Vol. 54. P. 493–496.

92. Boitsov I., Kanashenko S., Causey R. et al. Effect of radiogenic helium on stainless steel 12Cr18Ni10Ti mechanical properties and hydrogen permeability // *Ibid.* P. 497–500.

93. Баурин А. Ю., Фильчагин С. В., Голубков А. Н. и др. Отработка режимов подачи водорода с регулируемой обратной связью по давлению // Сб. докладов Четвертой Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-08». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 320–325.

94. Фильчагин С. В., Баурин А. Ю., Виноградов Ю. И. Автоматизация процесса подачи изотопов водорода по заданному закону изменения давления // Там же. С. 326–332.

95. Юхимчук А. А., Голубков А. Н., Теняев Б. Н. и др. Свидетельство на полезную модель № 9650. Стенд для исследования сорбционных свойств поглотителей изотопов водорода // Бюл. № 4, 1999.

96. Пат. 2171784 РФ. Способ приготовления гидрида ванадия / А. Н. Голубков, В. А. Голубев, А. И. Веденеев, В. В. Ярошенко // БИ № 22, 2001.

97. Пат. 2224719 РФ. Способ приготовления гидрида ванадия / А. Н. Голубков // БИ № 6, 2004.

98. Голубков А. Н., Гришечкин С. К., Юхимчук А. А., Лобанов В. Н. Источники изотопов водорода высокого давления на основе гидрида ванадия // Сб. докладов Международного семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 120–123.

99. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. Synthesis of the dihydride phase of vanadium // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. Vol. 404–406. P. 35–37.

100. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. Sources of gaseous high-pressure hydrogen isotopes // *J. Moscow Phys. Soc.* 1999. Vol. 3. P. 223.

101. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. High-Pressure Hydrogen Isotope Sources Based on Vanadium Hydride // *Hyperfine Interactions*. 2001. Vol. 138. P. 403–408.

102. Golubkov A. N., Yukhimchuk A. A. Equilibrium pressure of protium and deuterium over vanadium dihydride phase // *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides*. 2002. P. 255–264.
103. Голубков А. Н., Юхимчук А. А. Равновесные давления десорбции изотопов водорода над дигидридной фазой ванадия // Сб. докладов Второго Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-04». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 317–322.
104. Гришечкин С. К., Груздев С. К., Жерноклетов М. В. и др. Экспериментальное измерение сжимаемости, температуры и поглощения света в ударно-сжатом плотном газообразном дейтерии // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 80. Вып. 6. С. 452–458.
105. Сертификат № 18085, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 27240-04. Радиометр трития четырехканальный автоматизированный РГБ-06-4А.
106. Сертификат № 18083, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 27238-04. Радиометр трития четырехканальный автоматизированный РТА-4.
107. Vinogradov Yu. I., Kuryakin A. V., Yukhimchuk A. A. Measurement and control systems of tritium facilities for scientific research // *Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 48. P. 696–699.
108. Виноградов Ю. И., Придчин С. М., Курякин А. В. и др. Многоканальная автоматизированная система радиационного мониторинга // *Материаловедение*. 2002. № 6. С. 53–55.
109. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ): Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г.

Research and Development Facilities for Safety Handling with Tritium and its Compounds in Fundamental and Applied Study

A. A. Yukhimchuk, Yu. I. Vinogradov, A. N. Golubkov, S. K. Grishechkin,
A. M. Demin, D. L. Demin, V. V. Perevozchikov, A. M. Rodin,
G. M. Ter-Akopian, V. M. Kharitonov

Experimental facilities were created allowing to safely carrying out fundamental and applied study using tritium-containing components in conditions provided at non-specialized workrooms. Discussed are the technical characteristics of the equipment and setups relevant to the case, as well as methodological treatments providing reliable conditions for the research works done on the following problems: the muon catalyzed fusion; the study of properties of drip-line, light exotic nuclei; the phenomenon of super-permeability of tritium through the group V metals; penetration of hydrogen through constructional materials, including materials loaded with radiogenic ^3He ; the interaction of structural materials with hydrogen isotopes, including tritium as well, under pressure of up to 300 MPa.