УДК 546.11

НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С ТРИТИЕМ И ЕГО СОЕДИНЕНИЯМИ В ИНТЕРЕСАХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.А. Юхимчук¹, Ю.И. Виноградов¹, А.Н. Голубков¹, С.К. Гришечкин¹, А.М. Дёмин¹,
Д.Л. Дёмин², В.В. Перевозчиков¹, А.М. Родин², Г.М. Тер-Акопьян², В.М. Харитонов¹

¹Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

²Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия

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 лёгких экзотических ядер на границе нейтронной стабильности; явления «сверхпроницаемости» трития через металлы V группы и проницаемости водорода через конструкционные материалы, в том числе содержащие радиогенный ³He; взаимодействия конструкционных материалов с изотопами водорода, включая тритий при давлении до 300 МПа.

Ключевые слова: тритий, тритиевые мишени, экспериментальные комплексы, радиационная безопасность.

RESEARCH AND DEVELOPMENT FACILITIES FOR SAFETY HANDLING WITH TRITIUM AND ITS COMPOUNDS IN FUNDAMENTAL AND APPLIED STUDY

A.A. Yukhimchuk¹, Yu.I. Vinogradov¹, A.N. Golubkov¹, S.K. Grishechkin¹, A.M. Demin¹,
D.L. Demin², V.V. Perevozchikov¹, A.M. Rodin², G.M. Ter-Akopian², V.M. Kharitonov¹

¹Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physic, Sarov, Nizhny Novgorod reg., Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

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.

Key words: Tritium, tritium targets, experimental complex's, radiation safety.

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], исследованию ядерных реакций синтеза, катализированных мюоном [3], изучению процессов термоядерного синтеза в устройствах магнитного и инерционного удержания и т.д. Однако 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. Базируясь на многолетнем опыте работы с тритием во 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], исследований проницаемости и «сверхпроницаемости» металлов изотопами водорода [10, 11], исследовании совместного влияния ИВ и радиогенного ^3He на свойства конструкционных материалов (КМ) [12] и для ряда других исследований.

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

В основу создания оборудования, работающего с тритием и содержащими его веществами, положены принцип «разумного» соблюдения действующих в Российской Федерации норм и правил работы с этими веществами и наличие не менее трёх 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 трёх 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 рубеж защиты обеспечиваются силовым корпусом, состоящим из коаксиально сопряжённых сосудов со специально выполненным вакуумируемым барьером между этими сосудами [13, 14]. Применение этого подхода позволило создать ряд технических решений, направленных на минимизацию габаритов установок, и, по сути, создать радиационно безопасное оборудование для работы в условиях неспециализированных лабораторий.

КОМПЛЕКС ТРИТОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА

Для проведения систематических исследований явления МКЯРС в широком диапазоне температур, плотностей и концентраций ИВ коллаборацией ВНИИЭФ и ЛЯП ОИЯИ был создан комплекс ТРИТОН. Он включает в себя комплекс подготовки КПГС [4], криогенную установку [15], систему детектирования [16, 17] и сменные мишени — жидкотритиевую (ЖТМ) [18], тритиевые мишени высокого давления (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 $Z > 1$, подачи её в мишень и утилизации после завершения работ. Требования к КПГС, подходы к его созданию изложены в работе [22]. 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 работе [23]. Одним из основных требований при создании КПГС являлось обеспечение радиационной безопасности проводимых на нём 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 низкой (до 10 Ки) активности трития или давлении тритийсодержащей среды ниже атмосферного.

Работы по созданию комплекса были начаты в сентябре 1995 г., а в декабре 1996 г., после приёмочных 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, температуры от 20 до 800 К и давления до 150 МПа.

Рис. 1. Блок-схема КППС: D — точка дозиметрического контроля

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

— герметичного бокса, в котором расположены основные функциональные элементы КППС, обеспечивающие подготовку смеси заданного состава и чистоты и подачу её 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 формвакуумных насосов;

— установки газовой очистки, предназначенной для очистки газовых смесей от следов трития и его соединений, находящихся в герметичных объёмах (боксе, ресивере и др.);

— 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 объёмов, ресивера и др.;

— баллонного поста, обеспечивающего подачу диффузионно-чистых протия и дейтерия к КППС, заполнение герметичных технологических объёмов инертным газом и питание газового радиохроматографа газом-носителем;

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

— электрического пульта, обеспечивающего управление и контроль элементами КППС и тритиевых мишеней;

— автоматизированной системы контроля и управления, на начальном этапе эксплуатации обеспечивавшей контроль состояния основных элементов КППС и мишеней, которой в дальнейшем были переданы все функции электрического пульта, за исключением функции управления насосами.

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

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. Такой способ заполнения мишеней позволяет максимально обезопасить процесс заполнения 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 таком способе заполнения довольно просто обеспечить диффузионную очистку рабочего газа до уровня 10^{-7} объёмных долей по примесям, применяя диффузионные фильтры на основе палладиевых сплавов [27]. Исходя из этих соображений, и был разработан КППС. Газовые коммуникации КППС 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 используются для длительного хранения и генерации протия и дейтерия. Они содержат по 254 г ванадия марки ВЭЛ-2. Каждый из источников может генерировать до 70 л н.у. газа. При этом давление 20 МПа достигается при температуре ~ 140 °С на корпусе генератора. Два других генера-

тора содержат по 210 г ^{238}U и могут генерировать до 29 л газа каждый. Один из них используется для длительного хранения и генерации трития, 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, генераторы, содержащие тритий, — в выносных отсеках бокса, подстыкованных к его днищу. Причём выносные отсеки образуют с боксом единый герметичный объём, 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 счёт применения комплекса мероприятий:

- многоступенчатая диффузионная очистка на палладиевых фильтрах [27]. На разных стадиях подготовки рабочей смеси используются три диффузионных палладиевых фильтра;
- дополнительная очистка на гидридах металлов (V, U);
- многократная промывка мишени и газовых коммуникаций между мишенью и палладиевым фильтром диффузионно-чистыми ИВ. При этом магистрали прогревались до температуры ~200 °С, ТМВД — до 500 °С;
- обеспечение вакуумной гигиены.

Подготовка газовой смеси и подача её в мишень. Подготовка смеси производится путём измерения количества определённого ИВ волюмометрическим методом в калиброванной мерной ёмкости 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 ёмкость состоит из двух калиброванных объёмов 1990 см³ и 432 см³. Кроме того, газовые коммуникации между ёмкостью и датчиком образуют третий, калиброванный объём 70 см³. Такой набор калиброванных объёмов удобен для подготовки смеси любого изотопного состава.

После накопления смеси в металлгидридном смесевом генераторе может производиться её гомогенизация. Для этого смесь из генератора выделяется в калиброванную ёмкость, 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 посвящён цикл исследований [28—30], подтвердивших данное предположение.

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

Контроль молекулярного состава смеси осуществляется радиохроматографом [31, 32], описание которого подробно 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 давлении и температуре смеси ИВ, что негативно сказывалось на радиационной безопасности при проведении физических экспериментов. Для реализации исследований процессов МКЯРС при высоких плотности и температуре во ВНИИЭФ созданы две модификации тритиевой мишени высокого давления (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 учётом соблюдения следующих принципов, обеспечивающих радиационную безопасность: наличие трёх рубежей защиты на пути возможного проникновения ИВ в атмосферу; дублирование запорной ар-

матуры; 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 надёжность. 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.

Тритиевые мишени высокого давления. Для обеспечения исследований процессов МКЯРС при плотности смесей ИВ, превышающей достигнутые значения в экспериментах с применением мишеней LAMPF, созданы две модификации ТМВД, обеспечивающие безопасное проведение экспериментов при давлении смеси до 150 МПа и температуре до 800 К.

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

- давление смеси ИВ ≤ 120 МПа (1-я модификация) и ≤ 150 МПа (2-я 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 активности 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 надёжность 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 её нагревом до температуры 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 её эвакуация обеспечиваются КППС [4]. Ампула А мишени объёмом 16,5 см³ выполнена в виде двухслойного сосуда.

Рис. 2. Принципиальная схема ТМВД: А — ампула; БО — блок охлаждения; ВК — вакуумный кожух; К — колпак; Н1 и Н2 — нагреватели; Т1—Т3 — термодатчики; ДД(0—250 МПа) — тензометрический датчик давления; V1 и V2 — вентили высокого давления; V3—V6 — вентили; ИВ — измеритель вакуума; РЭ — радиационный экран; Е — емкость водородная; ВР — водородный редуктор; М1 и М2 — мановакуумметры

Наружный слой является вторым рубежом защиты от диффузионных утечек ИВ и одновременно является силовым корпусом ампулы, не подвергающимся пагубному воздействию ИВ [13, 14].

На границе раздела слоёв 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 объёме ампулы, путём прокачки через эту полость сжиженного водорода. Сжижение водорода обеспечивает блок охлаждения БО за счёт 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 путём вакуумирования внешней системой, входящей в состав КППС, производится утилизация диффундирующих из внутренней полости ампулы ИВ в процессе проведения экспериментов при высоких давлении и температуре. На границе раздела слоёв 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 корпус ампулы, корпус вакуумного кожуха.

Для обоснования времени эксплуатации и подтверждения радиационной безопасности 1-й модификации ТМВД согласно методологии, описанной в работах [34, 35], были проведены разносторонние исследования её составляющих компонентов, 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 применённое 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.

Последующий анализ конструкции ампулы этой модификации ТМВД, включающий в себя расчёт на прочность, проведённый путём решения трёхмерной 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 2-й 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 литров 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 температуры от 20 до 300 К. Для проведения исследований в этой области температуры 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 её конструкцию технические решения также мало чем отличаются от описанных решений. Исключением является то, что охлаждение мишени осуществлялось гелиевым криорефрижератором, расположенным в донной части ампулы.

Криогенная тритиевая мишень. Для измерения параметров МКЯРС в жидком тритии с погрешностью менее 10% и измерения корреляций $n-n$ и $\alpha-n$ 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 её окончания, удалять ^3He от распада трития из реакционной зоны в процессе проведения исследований, сжижать тритий и поддерживать температурный режим ампулы и источника в процессе эксперимента.

КТМ (рис. 3) имеет следующие технические характеристики:

- диапазон рабочей температуры 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 объём ампулы 8,1 см³;
- ресурс работы 250 ч;
- прочностная надёжность ампулы не менее 0,999999 при уровне доверительной вероятности 0,95.

Рис. 3. Принципиальная схема КТМ: А — ампула; ВК — вакуумный кожух; КР — криоголовка рефрижератора (COOL POWER 4,2 GM); ИВ — измеритель вакуума (PKR261); РЭ1 и РЭ2 — радиационные экраны; ТД1 и ТД2 — термодиоды типа D200 19 101 фирмы LEYBOLD AG; Т1 и Т2 — термодатчики; Н — электронагреватель; Е — буферная ёмкость; 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 представляет собой комплекс устройств, который обеспечивает проведение следующих операций:

- хранение трития в термодесорбционном металлгидридном источнике BS на основе ²³⁸U;
- генерирование трития из источника BS перед началом и его сорбцию по окончании работы;
- поддержание заданной эксплуатационной температуры ампулы мишени и термодесорбционного источника;
- срабатывание предохранительного пневматического клапана, соединяющего газовые коммуникации КТМ и КППГС 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 КППГС, данная мишень укомплектована металлгидридным источником трития на основе ²³⁸U, который расположен внутри вакуумного кожуха 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 ёмкость 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 вакуумном кожухе ВК. При эксплуатации мишени внутренняя полость кожуха непрерывно вакуумируется вакуумной системой КППГС [4] до остаточного давления не выше $5 \cdot 10^{-2}$ Па (контроль по измерителю вакуума ИВ PKR261 с диапазоном измерений $5 \cdot 10^{-7}$ — 10^5 Па).

Для охлаждения мишени используется криорефрижератор (COOL POWER 4,2GM). Криоголовка КР криорефрижератора герметично введена в вакуумный кожух ВК. Поскольку криорефрижератор работает с постоянной холодопроизводительностью, то регулировка и поддержание необходимой в ходе эксперимента температуры осуществляются электронагревателем Н, установленным между захолаживающей поверхностью Б криоголовки и корпусом ампулы. Для улучшения теплопередачи корпус ампулы мишени А и корпус нагревателя Н изготовлены из бескислородной 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 отеплении 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 её газовых коммуникаций введена буферная ёмкость 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 её элементами осуществляются автоматизированной СКУ. 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 термодпар Т1 и Т2 соответственно, измерять давление 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 термодиодом 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, её газовых коммуникаций, а также внутренней полости её 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, закреплённых 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 проведён 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, её посадкой на урановые ловушки с ёмкостью 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 погло-

щаются ураном, однако различные примеси, содержащие следы трития, все же проходят через урановые ловушки. С целью их улавливания выхлоп форвакуумных насосов осуществляется на откакумированный ресивер ёмкостью 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 изотопов водорода палладиевым катализатором при температуре 500 °С до воды и улавливании этой воды с помощью цеолитового сорбента. Контроль качества 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 их состояния (температура, давление, состояние клапанов и вентилей) осуществляются от электрического пульта. В его состав включена мнемосхема, 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 металлогидридных источниках или ТМВД производится отключение электропитания их нагревательных элементов, при определённых состояниях вентилей блокируется возможность включения насосов, электронагревателей и др.

Контроль параметров 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 проёмах 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 температуре и давлении 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 расчёта, что в случае выхода в бокс всего газа, имеющегося в установке, давление в нём, с учётом температурных колебаний, не превысит атмосферного. В боксе отсутствуют традиционные перчаточные проёмы. 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 объёмной активности трития в технологическом оборудовании, радиометр газов поисковый РГБ3-04, предназначенный 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 проведён полный цикл технологических операций с нерадиоактивными изотопами водорода.

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 корреляции n — n и α — n 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 расчётах интенсивного источника 14 МэВ-ных 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, проводится в ряде крупных лабораторий США, Германии, Франции, Японии, ЦЕРНе в Швейцарии. В России эти работы проводятся на установке АКУЛИНА [50] в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова (ЛЯР) в ОИЯИ. Пучки радиоактивных ядер, получаемые на этой установке, имеют энергию 15—45 МэВ/нуклон, что позволяет детально изучать структуры основных и возбуждённых состояний экзотических ядер на границе стабильности и за её пределами. Полнота и надёжность получаемых результатов гарантированы тем, что исследуемые ядерные состояния формируются в результате реакций передачи одного-двух нуклонов от хорошо изученных лёгких мишенных ядер бомбардирующим мишень радиоактивным ядрам ^3H , ^6He , ^8He . В ряду лёгких 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 тяжёлых радиоактивных ядер получают на установке АКУЛИНА в реакциях фрагментации ядер стабильных пучков, ускоренных на циклотроне У-400М.

Для проведения этих исследований коллаборацией 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 изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М. Доставка на мишень первичного пучка тритонов, ускоренных в циклотроне У-400М, осуществлялась с помощью сепаратора АКУЛИНА [50]. Требовалось обеспечить ток пучка ионов трития на мишени ~ 10 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 во ВНИИЭФ была создана система подачи в высокочастотный ионный источник (ИИ) циклотрона У-400М ЛЯР ОИЯИ изотопных молекул водорода при заданном соотношении их потоков и концентрации 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 используемого трития: из-за отсутствия свободного места в 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 $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{ч}$. Вместе с тем при настройке ионного источника потоки ИВ должны были составлять до нескольких $\text{см}^3/\text{ч}$. С целью обеспечения радиационной безопасности настройка источника осуществлялась с применением нерадиоактивных изотопов водорода — 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 трития (СУ) предназначена для проведения технологических операций с газовыми коммуникациями БП ИВ и очистки криогенных насосов ИИ циклотрона

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 (BOC EDWARDS GVSP30); ВП — вентили сильфонные вакуумные; Т1—Т3 — термпары; ГО — герметичный объём

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 ^{238}U . Конструктивно все источники выполнены в виде цилиндрических ампул с наружным электрическим нагревателем, содержат по 3 г ^{238}U и могут генерировать до 380 см^3 газа.

Дейтериевый источник BS3 используется при настройке ИИ циклотрона и в рабочем режиме, протий-дейтериевый источник BS2 используется при настройке тракта циклотрона и сепаратора АКУЛИНА, тритиевый источник BS1 используется в рабочем режиме при ускорении ионов трития. Источники BS2 и BS3 размещены вне герметичного объёма (ГО) БП ИВ (см. рис. 4), а источник BS1 — в герметичном объёме 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 геттера [8, 9]. Конструкция источника BS1 и герметичного объёма 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 $\text{Zr}(\text{V}_{0,8}\text{Cr}_{0,2})_2$. Поглотители на основе Ti характеризуются высокой удельной ёмкостью по водороду и низкими равновесными давлениями водорода над гидридом. Они эффективны в случае утилизации чистых изотопов водорода. Однако наличие таких примесей в газе, как O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 и др., снижает сорбционную ёмкость титана и скорость поглощения им водорода. Поэтому в системе утилизации перед титановыми поглотителями установлены поглотители с интерметаллидом $\text{Zr}(\text{V}_{0,8}\text{Cr}_{0,2})_2$, который обладает меньшей сорбционной ёмкостью, но менее чувствителен к примесям.

Разработанный БП ИВ при настройке ионного источника обеспечивает потоки протия и дейтерия до нескольких $\text{см}^3/\text{ч}$, в рабочем режиме потоки дейтерия и трития регулируются в пределах $5 \cdot 10^{-3}$ — $5\text{ см}^3/\text{ч}$.

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 размещённым в её внутренней полости диффузионным элементом в виде витого никелевого капилляра ($\varnothing 0,45 \times 0,1\text{ мм}$). Натекатель работает в режиме диффузионного перетекания ИВ из буферного объёма (1), заполненного ИВ от металлогидридного источника (В), через стенки капилляра (2) в канал (А), непосредственно связанный с ИИ.

Рис. 5. Схема натекателя: 1 — корпус натекателя; 2 — никелевый капилляр; 3 — электроввод

Отсутствие гидридного охрупчивания никеля в довольно широком диапазоне температур 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 путём 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 комнатной температуре 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, пропускаемого через капилляр.

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

Система контроля и управления. Структура СКУ и технические решения, использованные при её 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, нахо-

длежащей 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 надёжно 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/ч ($1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$).

Комплекс газового обеспечения. Для подачи трития в мишень и его последующей утилизации во ВНИИЭФ был разработан и создан комплекс газового обеспечения [8, 9]. Данный комплекс был введён 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 четырёх 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 трития и контроля радиационной обстановки (СУ);
- 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 трития (дейтерия); BS3 — источник трития; BS4 (5) — поглотитель ИВ; Б1 — баллон с гелием; Д1 (4) — измеритель вакуума (PRK261); Д2 — датчик давления (TRK261); Д3 — датчик давления (CMR261); ИК1 (2) — ионизационная камера; РД1 (2) — электроконтактный мановакуумметр (ДА2005); ФН1 (2) — насос форвакуумный (BOC EDWARDS GVSP30); ТН1 (2) — насос турбомолекулярный (STR 300M); В1—3, ВП22—25 — вентили сильфонные вакуумные; VE1—6 — вентили электромагнитные; V — мерная ёмкость; Т1—Т5 — термopара; Г1 (2) — геттер; ТД — термодиод; КР — криорефрижератор COOL POWER 2/10

Основным элементом комплекса является тритиевая мишень (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 (см. рис. 6), источник BS3 — в выносном герметичном корпусе СН, размещённом 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 объём наружных труб соединён с вакуумными коммуникациями СУ и РК.

Утилизация ИВ осуществляется путём 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 объёмной активности трития в технологических объёмах установки и воздушной среде рабочих помещений. Для измерения объёмной активности используются 4-канальные радиометры трития типа РГБ-06-4А и РТА-4, разработанные во 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 закреплённой к указанному корпусу и трубке Т1, а также внутренней полости В обечайки Д, служащей для размещения геттера Г. Внутренние объёмы 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 объём второго рубежа и будет полностью поглощён геттером Г. В качестве материала геттера используется порошкообразный титан, подготовленный по специальной технологии. Равновесное давление трития над активированным титаном при комнатной температуре 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, находящегося в коммуникациях мишени, СН и в источнике BS3 (см. рис. 6). Мишень имеет два

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

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 расчётам давление разрушения мембран М1 в случае подачи на них давления со стороны полости Е составляет ~2 МПа. Испытания на несущую способность, проведённые на двух макетах мишеней в нормальных температурных условиях, показали, что давление разрушения соответствует расчётному значению и составляет 2 и 2,2 МПа. В реальных 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 объёмом мишени. Затем включается криорефрижератор и начинается процесс охлаждения. Динамика процесса охлаждения контролируется по показаниям термодиода 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, проведённых 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. Впервые надёжно установлены свойства основных и возбуждённых 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 возбуждённых 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 энергией 58 МэВ. В результате анализа полученных данных 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. Определён 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 ${}^5\text{H}$ 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, определено основное состояние ${}^5\text{H}$, имеющее спин-чётность $J\pi = 1/2^+$ энергию $E_{\text{г.с.}} \approx 1,8$ МэВ и ширину $\Gamma \approx 1,3$ МэВ.

Получены спектры нижних состояний ядер ${}^8\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$, заселённых 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 ${}^8\text{He}$ ~25 МэВ/нуклон [67]. Основное состояние $0^+ {}^8\text{He}$ и его возбуждённые состояния 2^+ при энергии возбуждения $E^* = 3,6$ — $3,9$ МэВ и $(1^+) E^* = 5,3$ — $5,5$ МэВ получены с поперечными сечениями 200, 100—250 и 90—125 мкб/ср соответственно. Обнаруженная околопороговая аномалия спектра ${}^8\text{He}$ объяснена заселением состояния 1^- , т.е. мягкой дипольной модой возбуждения, присущей ядру ${}^8\text{He}$, имеющего 4-нейтронное гало. Нижняя по энергии группа событий обнаружена в спектре ${}^{10}\text{He}$ ~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

~140 мкб/ср. Этот результат является подтверждением того, что обнаруженный резонанс является основным состоянием ядра ^{10}He со спин-чётностью $J\pi = 1/2^-$. Получение основного состояния ^{10}He с указанным сечением, измеренным для реакции $^8\text{He}(t, ^{10}\text{He})p$, позволило авторам прийти к заключению о том, что отсутствие в измеренном спектре ^{10}He событий с энергией менее 2,5 МэВ доказывает факт отсутствия s-волнового состояния валентных нейтронов в структуре ядра ^{10}He .

УСТАНОВКА ПРОМЕТЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И «СВЕРХПРОНИЦАЕМОСТИ» МЕТАЛЛОВ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

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 решётку металла или даже только прилипающий к её поверхности, проникает сквозь мембрану независимо от её 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 трёх 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.

Состав установки. Внешний вид установки ПРОМЕТЕЙ [10, 11] показан 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 «трیتیевого трюка» [12]. Установка ПРОМЕТЕЙ имеет высокий уровень автоматизации, её 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].

Рис. 8. Внешний вид установки ПРОМЕТЕЙ

Исследование проницаемости изотопов водорода. 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 температуры 300—750 °С и давления 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 протидиффундировавшего через образец газа на выходной стороне регистрируется квадрупольным масс-спектрометром QMS200 и датчиком с диапазоном измерений 10^{-6} —1 Па.

Ячейка 1 (рис. 9) включает исследуемую плоскую мембрану (3), которая делит ячейку на входной (1) и выходной (2) объёмы, нагреватель (4), обеспечивающий разогрев мембраны до 1000 К, атомизатор (5), измеритель давления (8) и температуры (6). Во входной объём подаётся рабочее давление ИВ, выходной объём 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 трёх изотопов водорода через никель (модельный материал) и сталь 12X18H10T [71, 72].

Исследование «сверхпроницаемости» изотопов водорода. 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, состоящие из трёх групп 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.

Через входную сторону ячейки (1) непрерывно прокачиваются ИВ, выходная сторона ячейки (внешняя сторона цилиндра) непрерывно вакуумируется насосом, 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 проведён цикл работ по исследованию явления «сверхпроницаемости» ИВ через мембраны из ниобия и ванадия. Измерены параметры «сверхпроницаемости» трёх 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].

Рис. 9. Ячейка 1 для изучения проницаемости через КМ: 1 — входной объём; 2 — выходной объём; 3 — плоская мембрана; 4 — нагреватель мембраны; 5 — атомизатор; 6 — термopара; 7 — полость для сбора диффундирующего газа; 8 — датчик давления

Рис. 10. Ячейка 2 для исследования «сверхпроницаемости» ИВ: 1 — входной объём; 2 — выходной объём; 3 — цилиндрическая мембрана; 4 — атомизатор; 5 — кварцевые диски; 6 — натека; 7 — пирометр; 8 — датчик давления; 9 — диафрагма

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 НРБ-99/2009.

Для проведения детритизации тритированных образцов 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 повышенной температуре 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 осуществляется путём постоянного измерения остаточного давления газа в ячейке и периодического измерения относительного содержания T2 (шестой массы) с использованием масс-спектрометра QMS200. Критериями достижения радиационно-безопасного содержания трития в образцах являлись 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 содержание трития в образце 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, растворённого в материале образцов, водородом при выдержке образцов в нагретом состоянии под избыточным давлением водорода в течение определённого времени с последующим вакуумированием образцов. Для реализации этого метода создана специальная секция установки ПРОМЕТЕЙ. 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 отвакуумированную ионизационную камеру объёмом 20 л для измерения количества десорбированного трития, контейнер с образцами вакуумируется. Затем цикл повторяется. Детритизация образцов методом изотопного замещения продолжается до тех пор, пока объёмная 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, насыщения тритием КМ, заполнения D—T-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 методов «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 гидрида ванадия [79], служащих источниками T_2 и D_2 , и контейнер для исследуемых образцов. Перед проведением работ с тритием высокого давления коммуникации установки испытываются дейтерием из металлгидридного дейтериевого генератора. Этот генератор также может быть использован для приготовления газовой смеси изотопов водорода.

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

Исследуемый образец или мишени для УЛТС помещаются 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 быть вместе с образцом нагрет до температуры 873 К.

С помощью мерной ёмкости и датчиков давления может осуществляться контроль количества газа в установке и отдельных её частях, производиться расчёт 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 нём. Безопасность работ обеспечивается размещением сосудов давления, газовых коммуникаций и арматуры в герметичном боксе с открывающимся фланцем и смотровыми окнами. Внутренней газовой средой бокса являются инертные газы Ar или He. В боксе осуществляется непрерывный мониторинг газовой среды на наличие трития. Сброс газовой среды бокса и газа, диффундирующего через корпуса термодесорбционных источников ИВ и контейнера, осуществляется в откакумированный ресивер.

Внешний вид бокса комплекса ПАТРИЦИЯ показан на рис. 11.

Комплекс снабжён СКУ, обеспечивающей сбор информации о состоянии его узлов и агрегатов (температура, давление, состояние вентилей), обработку регистрируемых данных и анализ получаемых параметров.

С помощью комплекса ПАТРИЦИЯ был проведён 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 счёт суммарного влияния двух механизмов охрупчивания — водородного охрупчивания КМ и гелиевого охрупчивания КМ, обусловленного накоплением радиогенного гелия ^3He за счёт радиоактивного распада растворённого в КМ трития. Методы исследования водородного охрупчивания КМ хорошо известны, и им посвящено большое количество работ, в том числе и выполненных во 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 жёсткие 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 происходит изменение механических свойств КМ, достигается только после очень длительных выдержек.

Концентрация накопленного в КМ ^3He прямо пропорциональна концентрации растворённого в нём трития, которая в металлах меняется с давлением по закону квадратного корня, с температурой — по экспоненциальному закону. Таким образом, одним из реальных путей накопления в КМ больших коли-

Рис. 11. Внешний вид бокса комплекса ПАТРИЦИЯ

Концентрация накопленного в КМ ^3He прямо пропорциональна концентрации растворённого в нём трития, которая в металлах меняется с давлением по закону квадратного корня, с температурой — по экспоненциальному закону. Таким образом, одним из реальных путей накопления в КМ больших коли-

честв ^3He за сравнительно короткий период времени является метод «тритиевого трюка», основанный на создании в КМ высокой концентрации трития в результате выдержки исследуемого материала в среде газообразного трития при высоких температуре и давлении. Например, при повышении температуры образца до 873 К и давления трития до 50 МПа по сравнению с нормальными условиями концентрация растворённого в КМ трития повышается в $\sim 10^4$ раз [82].

С использованием комплекса ПАТРИЦИЯ проведены работы по насыщению тритием образцов из Ni, стали 12X18H10T, сплавов ХН40МДТЮ-ИД и ХН35ВТЮ-ВД. Реализованы два возможных подхода к получению образцов, насыщенных ^3He : непрерывная наработка ^3He при выдержке образцов в условиях воздействия высоких давления и температуры (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 изучения влияния водорода на свойства конструкционных материалов, содержащих радиогенный ^3He [85—92].

Наполнение дейтерий-трیتیевой смесью микромишеней для исследования лазерного термоядерного синтеза. При наполнении микромишеней, используемых для исследований УЛТС, необходимо удерживать плотную D—Т-смесь при высокой температуре в течение длительного времени.

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

Особенностью процесса насыщения тонкостенных стеклянных мишеней является необходимость тонкой регулировка 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 счёт изменения температуры нагрева источника [93, 94].

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

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОБОРУДОВАНИЯ

Создание в короткие сроки приведённых в данной работе комплексов и ряда других, о которых мы здесь не упоминаем, стало возможным благодаря ряду типовых решений и созданному 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 др. В этом разделе мы представим лишь некоторые из них.

Металлогидридные источники изотопов водорода. 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 ванадия. Он содержит самое большое среди гидридов металлов количество газа, приходящегося на единицу объёма гидрида, и этот газ под высоким давлением можно получить при относительно низкой температуре, когда КМ ещё сохраняют высокие прочностные свойства, диффузионные утечки ИВ через корпусные детали источников ещё 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].

Расчёт 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 расчёте прочности корпусов источников и оценке их прочностной надёжности.

Для обеспечения безопасности работы источников трития 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 снабжён 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.

Опыт эксплуатации источников (в составе КППС [4] с 1997 г.) показал их высокую надёжность. 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].

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

Основные технические характеристики металлогидридных источников, используемых в установках

Установка	Рабочее давление, МПа	Ёмкость по газу, л н.у.	Изотоп водорода
КППС	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

Радиометры трития. Для безопасного проведения работ на тритиевых комплексах необходимо проводить контроль объёмной активности трития как в технологических объёмах, так и в воздушной среде рабочих помещений. Единственные выпускавшиеся промышленностью на тот момент радиометры типа РГБ-06 оказались недостаточно надёжны. Входящие в состав этих радиометров блоки преобразования БПН-16П (преобразователь ток—время) часто выходили из строя, особенно при эксплуатации в составе газовых систем установок. Кроме того, на тот момент 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 автоматизированном 4-канальном радиометре трития 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.

Автоматизированный 4-канальный радиометр трития РТА-4 [106] является оригинальной разработкой. Радиометр обеспечивает широкий (шесть порядков) диапазон измерения объёмной активности. При этом нижний предел измерений с ионизационными камерами объёмом 10 л составляет соответственно 10^4 Бк/м³, что достаточно для измерения объёмной 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 надёжнее преобразователя БПН-16П.

Микропроцессорный блок регистрации и управления радиометра РТА-4 обеспечивает регистрацию выходных сигналов четырёх усилителей, вычисление токов ионизационных камер по выходным сигналам, управление переключением диапазонов, вычисление объёмных активностей трития, управление сигнализаторами. Радиометр может функционировать как автономно (со световой и звуковой сигнализацией об уровне объёмной 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 показан на рис. 13.

Рис. 13. Внешний вид радиометра РТА-4

Радиоохроматограф. Для анализа изотопного и молекулярного состава газовых смесей, содержащих Н—D—Т, при проведении работ на комплексе ТРИТОН [4] разработаны автоматизированный радиоохроматограф РХТ-2 [31] и его модернизированная версия РХТ-3 [32]. Радиоохроматограф зарекомендовал себя как прибор, обеспечивающий надёжное и безопасное проведение работ по измерению состава смесей ИВ.

Разделение ИВ в радиоохроматографе 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 Не. Детектирование компонентов газовой смеси осуществляется последовательно детектором по теплопроводности (ДТП) и ионизационной камерой (ИК).

Выход Не и различных молекулярных форм водорода из разделительной колонны происходит в последовательности $^3He \rightarrow H_2 \rightarrow HD \rightarrow HT \rightarrow D_2 \rightarrow DT \rightarrow T_2$. С помощью калибровочных экспериментов по чистым газам найдено, что коэффициенты относительной чувствительности ДТП для указанных молекулярных форм водорода равны $K_{HH}/K_{HD}/K_{HT}/K_{DD}/K_{DT}/K_{TT} = 1,00/0,74/0,59/0,59/0,49/0,39/31$.

СКУ радиоохроматографа 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 объёме проточной ионизационной камеры. Сигнал с диагонали моста ДТП регистрируется модулем аналогового ввода I-7011_2 с погрешностью 0,05%.

При работе радиоохроматографа 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 большей чувствительности ионизационной камеры по сравнению с ДТП её использование в составе радиохроматографа позволяет повысить точность измерений молекул, содержащих тритий. Для этого проводят перенормировку, т.е. коррекцию пиков НТ/ДТ/ТТ по ионизационной камере.

Для хроматографического анализа на базе пакета CRW-DAQ разработана специальная компьютерная программа. Программа обеспечивает управление сбором данных, обработку аппаратных кривых датчика теплопроводности и ионизационной камеры, расчёт молекулярного состава смеси и сохранение как первичных данных, так и конечных результатов анализа. Для расчёта состава газовой смеси по пикам датчика теплопроводности и ионизационной камеры служит 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, надёжность в работе, в том числе и с точки зрения радиационной безопасности, высокая 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 надёжность управления и измерения физических и технологических параметров. Кроме того, для безопасного проведения работ на этих комплексах требуются непрерывный мониторинг объёмной 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]. Пакет не является жёсткой программой, пригодной только для конкретной установки, а скорее средой разработки, совмещённой 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 снабжён встроенным транслятором языка Pascal. В результате на всех установках работает один и тот же программный пакет, 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 тритийсодержащими 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 твёрдого тела, применяются при создании оборудования, работающего с тритийсодержащими средами. Микромишени, заполненные ДТ-смесью, применяются в экспериментах по изучению параметров лазерного термоядерного синтеза на установках типа «Искра» во 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 во ВНИИЭФ, организациях Госкорпорации «Росатом», ОИЯИ, СПбГУТ, МГУ, СПбГУ, ЦЕРНе и ряде других организаций.

REFERENCES

1. **Lobashev V.M.** Measurements of neutrino mass in the tritium beta-decay. — Vestnik RAN (Herald of RAS), 2003, vol. 73, № 1 (in Russian).
2. **Jonson B.** Light dripline nuclei. — Physics Reports, 2004, vol. 389, pp. 1—59.
3. **Bystritsky V.M. et al.** — 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. **Yukhimchuk A.A., Apasov V.A., Vinogradov Yu.I. et al.** The gas provision complex of experiments on muonic catalysis of nuclear fusion reactions. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1999, № 6, pp. 17—23; Hyperfine Interactions, 1999, vol. 119, pp. 341—344 (in Russian).
5. **Perevozchikov V.V., Yukhimchuk A.A., Ganchuk N.S. et al.** Tritium high pressure target. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1999, № 1, pp. 28—33; Tritium high pressure target. — Hyperfine Interactions, 1999, vol. 119, pp. 353—355 (in Russian).
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, № 4, pp. 663—687; ZhETF (JETPh), 2005, vol. 127, issue 4, pp. 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; Proceedings of «EXON'2004». Singapore, 2005, pp. 592—601.
8. **Yukhimchuk A.A., Perevozchikov V.V., Apasov V.A. et al.** Tritium target for exotic neutron-rich nuclei research and its gas provision complex. — VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of nuclear reactors), 2002, issue 1—2, pp. 183—190 (in Russian).
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, pp. 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, pp. 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, pp. 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. — Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, № 1, pp. 609—612.
13. **Yukhimchuk A.A., Tikhonov V.I., Grishechkin S.K. et al.** A vessel for storage of hydrogen isotopes. RF patent № 2136064. MPK6 G21 F9/02. — Bulletin of inventions, № 24 of 27.08.1999 (in Russian).
14. **Ganchuk N.S., Grishechkin S.K., Kononenko A.A. et al.** Radiationally safe container for filling laser targets by D/T mixture. — In coll.: Hydrogen isotopes. Fundamental and applied researches. Edited by A.A. Yukhimchuk. — Sarov: RFNC – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 2009, pp. 488—493; J. of the Moscow Physical Society, 1999, vol. 9, № 4, pp. 289—294 (in Russian).
15. **Demin D.L., Dzhelepov V.P., Grafov N.N. et al.** — Hyperfine Interactions, 1996, vol. 101/102, pp. 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. — Hyperfine Interactions, 1999, vol. 118, pp. 111—119.
17. **Demin D.L., Dzhelepov V.P., Filchenkov V.V. et al.** — Hyperfine Interactions, 1996, vol. 101/102, pp. 591—597.
18. **Grafov N.N., Grebinnik V.G., Demin D.L. et al.** Liquid tritium target. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1999, № 1, pp. 21—27; Hyperfine interaction, 1999, vol. 119, pp. 349—351 (in Russian).
19. **Perevozchikov V.V., Yukhimchuk A.A., Ganchuk N.S. et al.** High-pressure tritium targets for study the muonic catalysis processes. — In coll.: Reports of the International seminar «The potential of the Russian nuclear centers and ISTC in tritium technology». Sarov, 17—21 May 1999, 2000, pp. 114—119 (in Russian).
20. **Perevozchikov V.V., Yukhimchuk A.A., Vinogradov Yu.I. et al.** High-pressure tritium targets for study the muonic catalysis processes of nuclear fusion reactions. — In coll.: Reports of the 2-d International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'04». — Sarov: RFNC – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 2005, pp. 381—392; Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48 (1), pp. 310—313 (in Russian).
21. **Yukhimchuk A.A., Tumkin D.P., Boytsov I.E. et al.** Cryogenic tritium target. — In coll.: Reports of the 2-d International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'04». — Sarov: RFNC— All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 2005, pp. 393—400; Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48 (1), pp. 294—297 (in Russian).
22. **Yukhimchuk A.A., Lobanov V.N.** Tritium handling. — Hyperfine Interactions, 1996, vol. 101/102, pp. 661—668.
23. **Yukhimchuk A.A., Lobanov V.N.** The approach to the design of high-pressure tritium facilities. — J. of the Moscow Physical Society, 1999, vol. 9, № 4, pp. 269—280.
24. **Yukhimchuk A.A., Demin D.L., Zinov V.G. et al.** The method of obtaining high density hydrogen isotopes. RF patent № 2163837. — Bulletin of inventions, № 24 of 27.08.1999 (in Russian).
25. **Yukhimchuk A.A., Tikhonov V.I., Demin D.L. et al.** The method of obtaining high density hydrogen isotopes. RF patent № 2174043. — Bulletin of inventions, № 24 of 27.09.2001 (in Russian).

26. **Kochetkov O.A., Fomin G.V., Zhuravlev V.F. et al.** Expert assessment of radiative safety at carrying out the experiments with tritium on a mu-catalysis in JINR (Joint Institute of Nuclear Researches). — Scientific report IBF MZ RF (IBPh HM RF), Moscow, 1992, p. 22 (in Russian).
27. **Klevtsov V.G., Lobanov V.N., Khabarov Yu.A., Yukhimchuk A.A.** Diffusion purification of hydrogen isotopes by palladium filters. — *Materialovedenie (Material science)*, 2002, vol. 5, pp. 53—56 (in Russian).
28. **Kreknin D.A., Ganchuk N.S., Golubkov A.N. et al.** Calculation of equilibrium composition and establishing time in a mixture of three hydrogen isotopes. — In coll.: Reports of International seminar «The potential of the Russian nuclear centers and ISTC in tritium technology». Sarov, 17—21 May 1999, 2000, pp. 225—238 (in Russian).
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, pp. 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. — *J. of the Moscow Physical Society*, 1999, vol. 9, № 4, pp. 281—288.
31. **Vinogradov Yu.I., Golubkov A.N., Shirnin P.V. et al.** Quantitative analysis of hydrogen isotopes by gas chromatograph PXT-2: Preprint RFNC — All-Russian RIEPh № 83. — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2002 (in Russian).
32. **Fil'chagin S.V., Buchirin A.V., Vinogradov Yu.I. et al.** Development of a PXT-3 radiochromatograph for isotope and molecular analysis of hydric gas compositions. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2008, issue 2, pp. 93—96 (in Russian).
33. **Watts K.D., Jones S.E., Caffrey A.J.** — In: Proc. 10th Symposium on Fusion Engineering (IEEE/ANS). Philadelphia, 1983, pp. 1143—1147.
34. **Boytsov I.E., Ganchuk N.S., Grishechkin S.K. et al.** Development of high-pressure hydrogen isotopes vessels. — Reports of International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'01». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2002, pp. 256—262 (in Russian).
35. **Grishechkin S.K., Lobanov V.N., Yukhimchuk A.A.** Ensuring operation safety of high-pressure vessels for work with tritium at the stage of their development. — Reports of the 2-d International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'04». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2005, pp. 372—380; Proceedings of RFNC — All-Russian RIEPh, Sarov, 2007, vol. 11, pp. 340—349 (in Russian).
36. **Vinogradov Yu.I., Kuryakin A.V. et al.** Automated control system for preparation complex of gas mixtures for the experimental investigation of mu-meson catalysis of nuclear fusion reactions. — *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique)*, 2004, № 1, pp. 1—13 (in Russian).
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, pp. 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. — *Hyperfine Interactions*, 2001, vol. 138, pp. 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.*, pp. 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.*, pp. 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, 5 p.
42. **Demin D.L., Filchenkov V.V., Grafov N.N. et al.** On the experimental investigation of muon catalyzed $t + t$ fusion. — *Communication JINR*, E15-2003-199, Dubna, 2003, 10 p.
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, pp. 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, № 2, pp. 216—225.
45. **Bogdanova L.N., Bom V.R., Demin D.L. et al.** Search the reactions of radiative capture $d + d \rightarrow 4\text{He} + \gamma$ from the $dd\mu$ muonic molecule state. — *Yadernaya fizika (Nuclear physics)*, 2002, issue 65, № 10, pp. 1826—1832 (in Russian).
46. **Baluev V.V., Bogdanova L.N., Bom V.R. et al.** Experimental search for the radiative capture reaction $d + d \rightarrow 4\text{He} + \gamma$ from $dd\mu$ muonic molecule state $J = 1$. — *JETP*, 2011, vol. 139, issue 6, pp. 1—7.
47. **Anisimov V.V., Arkhangel'skiy V.A., Kavaleri E. et al.** An intense source of 14 MeV neutrons on the basis of muonic catalysis of nuclear fusion reactions (MC INS). — In coll.: Hydrogen isotopes. Fundamental and applied researches. Edited by A.A. Yukhimchuk. — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2009, pp. 166—172; *Fusion Technology*, 2001, vol. 39, № 2, pp. 98—2008 (in Russian).
48. **Yukhimchuk A.A., Arkhangel'skiy V.A.** Tritium fuel cycle MC INS. — In coll.: Reports of International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'01». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2002, pp. 85—92 (in Russian).
49. **Yukhimchuk A.A., Arkhangel'skiy V.A.** Tritium fuel cycle for muon-catalyzed intense neutron source (MC INS). — *Hyperfine Interactions*, 2001, vol. 138, pp. 409—415; *Fusion Science and Technology*, 2002, vol. 41, pp. 826—830.
50. **Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V. et al.** — *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 1997, vol. A 391, p. 228.
51. **Yukhimchuk A.A., Angilopov V.V., Apasov V.A. et al.** The system of hydrogen isotopes delivery into the cyclotron ion source U-400M. — In coll.: Reports of 2-d International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'04». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2005, pp. 401—410 (in Russian).
52. **Yukhimchuk A.A., Golubkov A.N., Zlatoustovskiy S.V. et al.** Device for hydrogen delivery into receiver (options). RF patent № 2234973C2. — *Bulletin of inventions* № 24 of 27.08.2004 (in Russian).

53. **Vinogradov Yu.I., Aryutkin V.S., Kuryakin A.V. et al.** Control and management system of tritium target complex for exotic neutron-rich nuclei research. — VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of nuclear reactors), 2002, issue 1—2, pp. 197—200 (in Russian).
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. — In: Proc. of the Intern. Conf. Nuclear Physics at Border Lines. Lipari (Messina), Italy, 21—24 May 2001, pp. 372—375.
55. **Golovkov M.S., Oganessian Yu.Ts., Ter-Akopian G.M.** Super-heavy hydrogen isotopes studied with 58-MeV triton beam. — In: Coll. of Reports of International Symposium on Exotic Nuclei. Lake Baikal, Russia, July 24—28, 2001, pp. 334—346.
56. **Oganessian Yu.Ts., Ter-Akop'yan G.M., Bogdanov D.D. et al.** The study of the hydrogen and helium ultraneutron-rich nuclei structure using the reactions of radioactive beams on tritium target. — Proceedings of the Academy of Sciences. Ser. physical, 2002, vol. 66, № 5, pp. 619—624 (in Russian).
57. **Golovkov M.S., Oganessian Yu.Ts., Bogdanov D.D. et al.** Evidence for resonance states 5H. — Physics Letters B, 2003, vol. 556, pp. 70—75.
58. **Ter-Akop'yan G.M. et al.** — Yadernaya fizika (Nuclear physics), 2003, vol. 66, pp. 1587 (in Russian).
59. **Sidorchuk S.I., Golovkov M.S., Oganessian Yu.Ts.** Experimental study of the hydrogen isotopes beyond the drip-line 4,5H. — In: Coll. of Reports of International Symposium on Exotic Nuclei. Petersburg, Russia, July 5—12, 2004, pp. 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 C72, 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, № 2, pp. 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, pp. 22—29.
65. **Sidorchuk S.I., Bogdanov D.D., Fomichev A.S. et al.** — Phys. Lett., 2004, vol. B 594, pp. 54—60.
66. **Golovkov M.S., Grigorenko L.V., Fomichev A.S. et al.** — Phys. Rev., 2005, vol. C 72, p. 064612.
67. **Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Golovkov M.S. et al.** — Eur. Phys. J., 2009, vol. A 42, pp. 465—469.
68. **Gabis I.E.** The method of concentration pulses for studying hydrogen transport in solids. — J. Techn. Physics, 1999, vol. 44, № 1, pp. 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, № 170, pp. 79—94.
70. **Vinogradov Yu.I., Kuryakin A.V., Aryutkin V.S. et al.** Automated system for monitoring, control and data acquisition of «Prometheus» stand. — Materialovedenie (Material science), 2002, № 1, pp. 46—50 (in Russian).
71. **Денисов Е.А., Курдюмов А.А., Компаниets Т.Н. et al.** Hydrogen permeability of steel 12X18H10T, containing radiogenic helium. — In coll.: Reports of the 3-d International conference «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'07». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2008, pp. 126—132 (in Russian).
72. **Musyaev R.K., Lebedev B.S., Busnyuk A.A. et al.** Investigations of metals permeability and super permeability phenomena on installation «Prometheus». — Materialovedenie (Material science), 2002, issue 6, pp. 45—48 (in Russian).
73. **Musyaev R.K., Lebedev B.S., Grischevkin S.K. et al.** Tritium superpermeability: experimental investigation and simulation of tritium recirculation in «PROMETHEUS» setup. — Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, № 1, pp. 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. — Fusion Science and Technology, 2008, vol. 54, № 2, pp. 523—525.
75. **Musyaev R.K., Lebedev B.S., Yukhimchuk A.A. et al.** Study of the phenomenon of hydrogen isotope superpermeation through a vanadium membrane at «Prometheus». — VANT. Ser. Termoyadernyy sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 2, pp. 26—31 (in Russian).
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. — In: Proc. of the 2008 Intern. Hydr. Conf. ASM International, 2009, pp. 735—742.
77. **Malkov I.L., Klevtsov V.G., Yukhimchuk A.A.** The method of «tritium trick» for the accelerated accumulation of helium-3 in structural materials. — Materialovedenie (Material science), 2002, issue 5, pp. 34—37 (in Russian).
78. **Malkov I.L., Grischevkin S.K., Zlatoustovskiy S.V. et al.** ^3He containing samples preparation for studies of physical and mechanical properties of structural materials. — VANT. Ser. Termoyadernyy sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 2, pp. 72—79 (in Russian).
79. **Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A., Kononenko A.A.** Thermodesorption of vanadium — based hydrogen isotope sources. — Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, № 1, pp. 527—533.
80. **Boitsov I.E., Grischevkin 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 J. of Hydrogen Energy, 1999, vol. 24, pp. 919—926.
81. **Boitsov I.E., Baluev V.V., Grischevkin S.K. et al.** Research of influence of high pressure hydrogen on mechanical properties of some stainless steels in the temperature range from minus 800 °C to room. — In coll.: Reports of the 3-d International conference «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'07». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2008, pp. 302—308 (in Russian).

82. **Zlatoustovskiy S.V., Klevtsov V.G., Malkov I.L. et al.** Creation method of tritium heightened concentration in structural materials. — In coll.: Reports of International seminar «The potential of the Russian nuclear centers and ISTC in tritium technology». All-Russian RIEPh, Sarov, 2000, pp. 39—42 (in Russian).
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, № 1, pp. 613—616.
84. **Denisov E.A., Kurdyumov A.A., Kompaniets T.N. et al.** Interaction of hydrogen with steel 12X18H10T, containing radiogenic helium. — In coll.: Reports of the 3-d International conference «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM'07». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh. 2008, pp. 283—291 (in Russian).
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, № 2, pp. 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., pp. 497—500.
87. **Boytsov I.E., Grishechkin S.K., Yukhimchuk A.A. et al.** Radiogenic ^3He and hydrogen impact on mechanical properties and structure of 12Cr18Ni10Ti stainless steel. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 2, pp. 50—55 (in Russian).
88. **Denisov E.A., Kurdyumov A.A., Kompaniets T.N. et al.** Hydrogen and radiogenic helium in steel 12X10H10T. — In the same place, pp. 56—65 (in Russian).
89. **Kanashenko S.L., Gorodetskiy A.E., Zakharov A.P. et al.** Investigation of stainless steel 12X18H10T structure, containing radiogenic helium. — In the same place, pp. 66—72 (in Russian).
90. **Boytsov I.E., Grishechkin S.K., Glugla M. et al.** Mechanical properties of steel 12X18H10T, containing up to 250 appm of radiogenic ^3He . — In coll.: Materials of the XLVII Intern. conf. «Actual problems of strength». Nizhny Novgorod, 01—05 July 2008, pp. 105—107 (in Russian).
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, pp. 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., pp. 497—500.
93. **Baurin A.Yu., Fil'chagin S.V., Golubkov A.N. et al.** Verification of hydrogen delivery modes with adjustable feedback by pressure. — In coll.: Reports of the 4-th International school of young scientists and specialists «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM-08». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2009, pp. 320—325 (in Russian).
94. **Fil'chagin S.V., Baurin A.Yu., Vinogradov Yu.I.** Automation of the process of hydrogen isotopes delivery by the given law of pressure changing. — In the same place, pp. 326—332 (in Russian).
95. **Yukhimchuk A.A., Golubkov A.N., Tenyaev B.N. et al.** The stand for investigation of the sorptive properties of hydrogen isotopes absorbers. Certificate on useful model № 9650. — Bulletin of inventions, № 4 of 16.04.1999 (in Russian).
96. **Golubkov A.N., Golubev V.A., Vedenev A.I., Yaroshenko V.V.** Method of preparation the vanadium hydride. Patent RU № 2171784. — Bulletin of inventions, № 22 of 10.08.2001 (in Russian).
97. **Golubkov A.N.** Method of preparation the vanadium hydride. RF patent № 2224719. — Bulletin of inventions № 6 of 27.02.2004 (in Russian).
98. **Golubkov A.N., Grishechkin S.K., Yukhimchuk A.A., Lobanov V.N.** High pressure hydrogen isotopes sources based on vanadium hydride. — In coll.: Reports of International seminar «The potential of the Russian nuclear centers and ISTC in tritium technology». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2000, pp. 120—123 (in Russian).
99. **Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A.** Synthesis of the dihydride phase of vanadium. — J. of Alloys and Compounds, 2005, vol. 404—406, pp. 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, pp. 403—408.
102. **Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A.** Equilibrium pressure of protium and deuterium over vanadium dihydride phase. — In: Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides. Ed. by M.D. Hampton et al. Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 255—264.
103. **Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A.** The equilibrium pressures of hydrogen isotopes desorption over dihydride phase of vanadium. — In coll.: Reports of the 2-d International seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials. IHISM-04». — Sarov: RFNC — All-Russian RIEPh, 2005, pp. 317—322 (in Russian).
104. **Grishechkin S.K., Gruzdev S.K., Zhernokletov M.V. et al.** Experimental measurement of compressibility, temperature and light absorption in shock-compressed dense gaseous deuterium. — Pis'ma v ZhTF (Letters to JTPH), 2004, vol. 80, issue 6, pp. 452—458 (in Russian).
105. **4-channel** automated tritium radiometer RGB-06-4A. Certificate № 18085, registered in the State register of measuring instruments under № 27240-04 (in Russian).
106. **4-channel** automated tritium radiometer RTA-4. Certificate № 18083, registered in the State register of measuring instruments under № 27238-04 (in Russian).
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, pp. 696—699.
108. **Vinogradov Yu.I., Pridchin S.M., Kuryakin A.V. et al.** Multichannel automated system of radiative monitoring. — Materialovedenie (Material science), 2002, № 6, pp. 53—55 (in Russian).

109. **Kuryakin A.V., Vinogradov Yu.I.** Computer program for automation of physical measurements and experimental installations (CRW-DAQ). Russian Federation certificate on official registration of computer program № 2006612848 of 10.08.2006 (in Russian).

AUTHORS

Yukhimchuk A.A. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia; arkad@triton.vniief.ru

Vinogradov Yu.I. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Golubkov A.N. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Grishechkin S.K. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Demin A.M. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Demin D.L. Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

Perevozchikov V.V. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Rodin A.M. Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

Ter-Akopian G.M. Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

Kharitonov V.M. Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Institute of Experimental Physics, Mira Ave 37, 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia

Received 14 May 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 3, pp.26—52