



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2002-182

Ю-941

На правах рукописи
УДК 539.1.07: 539.126.333

ЮХИМЧУК
Аркадий Аркадьевич

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЮОННОГО КАТАЛИЗА
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА
В ПЛОТНЫХ СМЕСЯХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА**

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Российском Федеральном Ядерном Центре -
Всероссийском научно-исследовательском институте
экспериментальной физики
(Саров)
и в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований
(Дубна)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
доктор технических наук, с.н.с.,
академик МАНЭБ

Герштейн С.С.

Оганесян Ю.Ц.

Беловодский Л.Ф.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
физики им. Фока Санкт - Петербургского государственного университета,
г. С.-Петербург

Защита диссертации состоится "6 декабря 2002г. на заседании
диссертационного совета Д720.001.03 в Объединенном институте ядерных
исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан 2 "VII" 2002г.

Ученый секретарь совета
доктор физико-математических наук



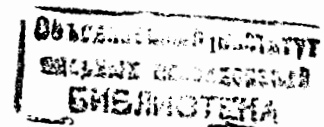
Багусов Ю.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Теоретически мюонный катализ ядерных реакций синтеза (далее по тексту МК) был предсказан Чарльзом Франком более 55 лет тому назад в 1947 году, после открытия Латесом, Оккиалини и Пауэлом в 1937г. π -мезона и его распада на мюон и нейтрино: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Год спустя в 1948г. А.Д. Сахаров показал, что после образования $dd\mu$ -молекулы мгновенно происходит ядерная реакция, и предложил использовать МК для производства энергии и нейтронов. В 1954г. Я.Б. Зельдович впервые оценил скорость ядерной реакции в $dd\mu$ -молекуле, которая оказалась на много порядков величины выше, чем скорость распада мюона. И только в 1956г. Альварец экспериментально обнаружил МК в цепочке реакции $p\mu \rightarrow d\mu \rightarrow pd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$. Это открытие вызвало большой энтузиазм среди физиков. Работы по исследованию процессов МК были развернуты по всему миру. Однако первые же экспериментальные результаты в жидком дейтерии показали, что скорость образования $dd\mu$ молекулы очень мала ($7 \cdot 10^4 \text{с}^{-1}$), а, соответственно, цепочки МК очень коротки. Этот результат значительно уменьшил интерес к изучаемому явлению тех физиков, которые хотели сразу же применить МК для получения "чистой ядерной" энергии.

Следующие пять лет (1962-67г.г.) работы в этой области продолжали лишь две группы: в Дубне группа В.П.Джелепова и в Болонье (Италия) группа E. Zavattini. И именно в это время в экспериментах с газовыми мишенями высокого давления в Дубне было открыто новое явление - явление резонансного образования молекулы $dd\mu$. Оказалось, что скорость образования $dd\mu$ -молекул зависит от температуры, в частности, при температуре 380К она на порядок величины больше, чем в жидком дейтерии. Объяснение этому наблюдению было предложено Е.А. Весманом, работавшего в то время в Дубне под руководством С.С. Герштейна. Основная идея заключалась в том, что нейтральный $d\mu$ -атом проникает в молекулу дейтерия и прилипает к одному из его ядер, образуя новый мезомолекулярный комплекс согласно реакции $d\mu + D_2 \rightarrow [(dd\mu)d_2e]_\nu$. Энергия связи образующегося комплекса равна энергии связи $dd\mu$ -молекулы $\sim 2\text{эВ}$ и кинетической энергии налетающего $d\mu$ атома. Скорость образования $dd\mu$ -молекулы зависит от температуры, поскольку за счет энергии налетающего $d\mu$ -атома $\epsilon=3/2kT$ осуществляется резонансная подстройка. Позже Л.И.Пономарев и его коллеги провели теоретические расчеты трехчастичной системы с кулоновским взаимодействием, в которых они впервые



получили энергию слабо связанного состояния молекулы, равную 1.96эВ, что позволило с хорошей точностью описать экспериментальные данные, полученные группой В.П. Джелелова. Окрыленные этим успехом, в 1977г. они оценили энергию слабо связанного возбужденного состояния $d\mu$ -молекулы, которая оказалась равной всего лишь 0.66эВ. Расчеты также показали, что количество циклов МК в смеси дейтерия и трития, инициируемое одним мюоном, должно быть равно ~ 100 . Для проверки этого результата в Дубне всего за год были созданы методика и оборудование для проведения экспериментов в дейтерий-третиевых смесях, и уже в 1978г. было установлено, что скорость образования $d\mu$ -молекулы $\lambda_{d\mu} \approx 10^8 \text{ с}^{-1}$ в полном соответствии с предсказаниями теоретиков.

Появление этих результатов вызвало новую волну экспериментальных и теоретических исследований процессов МК практически на всех установках, способных получать мезоны: LAMPF (США), PSI (Швейцария), ЛИЯФ (Россия), КЕК (Япония), TRIUMF (Канада), RAL (Великобритания) и ряде других. В 1982г. были начаты эксперименты в Лос Аламосской Национальной Лаборатории с дейтерий-третиевыми мишенями высокого давления, в которых были получены рекордные выходы нейтронов (150 ± 20) на один мюон. В PSI (Виллиген) с участием IMEP (Вена), LLNL (Ливермор) и LBL (Беркли) проводились исследования МК в жидких дейтерий-третиевых смесях. В Гатчине группой А.А.Воробьева в 1983г. была создана оригинальная ионизационная камера высокого давления ($\sim 10 \text{ МПа}$), на которой впоследствии были выполнены прецизионные измерения параметров МК. Однако эти результаты давались не легкой ценой. Созданные установки были направлены на получения "быстрого" результата и не отвечали в полной степени все возрастающим требованиям радиационной безопасности. Позже об условиях работ на этих установках говорилось: "... не наблюдалось значительного облучения персонала тритием". Полученные результаты не позволяли использовать МК для прямого получения энергии (для положительного энергетического выхода необходимо не менее 300 актов синтеза на один мюон). Это сказалось и на проведении дальнейших исследований МК, и к концу 80-х их интенсивность снова значительно уменьшилась.

Тем не менее, даже при числе циклов $\sim 100/\mu^-$ МК можно использовать в мюонно-каталитическом гибридном реакторе (МКГР) и интенсивном источнике монохроматичных 14 МэВ'ных нейтронов (МК ИИН).

В 1992г. были выполнены теоретические работы, предсказывающие новые особенности МК в тройной смеси. Оказалось, что скорость резонансного образования $d\mu$ -молекулы в смеси в несколько раз выше, чем в бинарной D/T смеси.

Для подтверждения этих теоретических предсказаний и нахождения оптимальных условий протекания МК в смеси H/D/T, потребовалось проведение систематических исследований процессов МК в многофакторном пространстве температур, давлений и концентраций изотопов водорода (ИВ) в исследуемых смесях. Кроме того, результаты исследований МК могут быть использованы и широко используются в таких областях фундаментальных исследований как: *атомная физика, молекулярная физика, ядерная физика, физика слабых взаимодействий и квантовая электродинамика*. Основной проблемой, без решения которой невозможно было осуществить эти работы, была проблема создания радиационно-безопасного оборудования для работ с тритием в низкофоновой лаборатории фазотрона ЛЯП ОИЯИ, решение которой является актуальной задачей, имеющей важное научное значение.

В связи с вышеизложенным основной целью диссертационной работы является создание радиационно-безопасного оборудования для работ с тритием при проведении систематических экспериментальных исследований процессов МК в широком диапазоне смесей ИВ при плотности $0.2 \leq \rho \leq 1.4$, в диапазоне температур 10-800К.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- разработка методов и аппаратуры получения высокого давления ИВ, включая тритий, при обеспечении чистоты газа на уровне не менее 10^7 об. долей по примесям с $Z \geq 4$ и радиационной безопасности;
- создание методики подготовки смеси заданного изотопного и молекулярного состава и аппаратуры для ее анализа;
- создание конструкций мишеней, обеспечивающих, с одной стороны, минимальное экранирование μ -пучка и продуктов ядерных реакций, а с другой – радиационную безопасность и высокую надежность;
- выбор конструкционных материалов, удовлетворяющих требованиям высокой стойкости к воздействию ИВ, включая тритий, обладающих хорошей технологичностью, свариваемостью и низкими параметрами водородопроницаемости;
- создание методик и оборудования для проведения исследований влияния трития на эксплуатационные характеристики конструкционных материалов;
- выбор защитных покрытий для предотвращения диффузионных утечек трития в окружающую среду;
- создание малогабаритных радиационно-безопасных источников ИВ высокого давления;

- разработка системы контроля и управления установкой и ее элементами;
- создания системы радиационного мониторинга в газовых коммуникациях технологического оборудования и рабочей зоне.

Достижение поставленных целей осуществлялось с использованием следующих методических и технологических приемов:

- использование металлогидридных систем для хранения, транспортирования, получения давления и утилизации ИВ;
- использование металлогидридных систем и диффузионных палладиевых фильтров для очистки смесей ИВ и получения молекулярного равновесного состояния;
- применение радиохроматографической методики для анализа молекулярного и изотопного состава смесей ИВ;
- использование водродостойких КМ;
- использование имеющейся и создание новой экспериментальной базы РФЯЦ-ВНИИЭФ для проведения: исследований по выбору КМ, исследования систем "металл – ИВ" при высоких давлениях, ускоренной наработки ^3He в матрице КМ и определения его объемного содержания, прочностной и функциональной отработки элементов комплекса, ресурсных испытаний;
- применение современного программного обеспечения и использование современной элементной базы для создания систем контроля и управления комплексом.

Научная новизна работы.

1. Разработан и создан радиационно-безопасный комплекс подготовки газовой смеси для обеспечения экспериментов по МК, позволяющий проводить работы с тритием в количествах до 10 кКи в условиях открытых лабораторий, обеспечивающий подготовку смеси заданного изотопного состава, анализ молекулярного и изотопного состава смеси, очистку смеси до уровня не хуже 10^{-7} об. долей по примесям с $Z > 4$, подачу её в мишень и утилизацию после завершения работ.
2. Впервые в сосудах высокого давления, применяемых для работы с тритийсодержащими газами высокого давления, применена конструкция в виде автофритированного сосуда с двойным рубежом защиты от несанкционированного проникновения трития в атмосферу. Новизна технических решений, заложенных в конструкцию, подтверждена Патентом РФ.

3. В мишенях для исследования процессов МК применена система сжижения ИВ прокачкой охладителя (жидкого водорода) через полость между наружным и внутренним корпусом автоскрепленного сосуда. Новизна технических решений подтверждена Патентом РФ.
4. Для получения высокой плотности ИВ при исследованиях процессов МК применен метод накопления жидких ИВ в ампуле под высоким давлением, получаемым от ванадиевого генератора. Новизна технических решений подтверждена Патентом РФ.
5. Получены новые результаты по длительной прочности сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений при воздействии водорода высокого давления до 150МПа в диапазоне температур до 700°C .
6. Впервые получены параметры водородопроницаемости как сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений, так и сплава с защитным покрытием из нитрида титана в диапазоне температур до 800°C . Найдено, что при температуре $400-500^{\circ}\text{C}$ для покрытия из нитрида титана существует излом кривой проницаемости, связанный, по-видимому, с изменением механизма транспорта водорода через это покрытие.
7. Для исследования влияния трития на служебные свойства КМ, применяемых для работы с высоким давлением трития, разработаны новые методики и оборудование, позволяющие проводить ускоренное накопления и определение объемного содержания радиогенного гелия в матрице КМ.
8. Впервые для систем "ванадий – ИВ" получена диаграмма состояния в координатах давление – температура – концентрация (P-T-C) в диапазоне давлений до 500МПа.
9. Впервые получены зависимости параметров цикла МК в тройной H/D/T смеси ИВ в диапазоне температур 20-800К и плотностей до 0.9 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси.
10. Получены новые значения параметров цикла МК в двойной D/T смеси в диапазоне температур 20-800К и плотностей до 1.3 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси.
11. Впервые получены экспериментальные значения параметров цикла МК для дейтерия в диапазоне температур 400-800К при высоких плотностях дейтерия.
12. Результаты, полученные в данной работе, позволили создать новое направление - разработка систем для проведения радиационно-безопасных работ с тритийсодержащими веществами при выполнении исследований в области фундаментальной и прикладной физики.

Практическая ценность работы.

1. Разработано и создано оборудование для проведения исследований процессов МК в смесях ИВ, на котором проведены и продолжают проводиться систематические экспериментальные исследования процессов МК в смесях ИВ в широком диапазоне плотностей, температур и концентраций ИВ.
2. Разработаны и созданы источники давления ИВ на основе металлгидридов, которые в настоящее время применяются в исследованиях: процессов МК (ЛЯП ОИЯИ); нейтронно-избыточных систем на границе нейтронной стабильности (ЛЯР ОИЯИ); систем "металлогидрид – ИВ", воздействия трития на физико-механические свойства КМ, в измерениях уравнения состояния дейтерия в области мегабарных давлений (РФЯЦ-ВНИИЭФ) и в ряде других экспериментальных работ.
3. Разработан и создан радиохроматограф для определения молекулярного и изотопного состава смеси ИВ при исследованиях процессов МК и при проведении ряда работ по тематике РФЯЦ-ВНИИЭФ.
4. Разработано, создано и прошло метрологическую аттестацию отраслевой лабораторией измерительной техники дозиметрическое оборудование для определения объемной активности трития в газовых средах.
5. Разработанная система контроля и управления комплексом широко используется при проведении различных экспериментальных исследований в ЛЯП и ЛЯР ОИЯИ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, СПбГУТ и ряде других организаций.
6. Результаты исследований параметров МК, полученные в настоящей работе, используются в атомной физике, ядерной физике, физике слабых взаимодействий и квантовой электродинамике, а также при расчете конструктивной схемы интенсивного источника нейтронов на базе мюонного катализа.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Разработка и создание комплекса оборудования, включающего в себя: комплекс подготовки газовой смеси, семейство тритиевых и дейтериевых мишеней высокого давления и источники изотопов водорода высокого давления на базе дигидридной фазы ванадия для проведения исследований процессов МК в смесях ИВ.
2. Результаты исследований физико-механических свойств сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений в условиях длительного воздействия водорода высокого давления в диапазоне температур 300-1000К и параметров водородопроницаемости,

как для данного сплава и его сварных соединений, так и для сплава с защитным покрытием из нитрида титана.

3. Разработка метода и оборудования для проведения ускоренного накопления радиогенного гелия и определения его объемного содержания в матрице КМ.
4. Диаграмма состояния систем "ванадий – ИВ" в координатах давление – температура – концентрация (P-T-C) в диапазоне давлений до 500МПа.
5. Результаты экспериментов по измерению параметров МК в смесях ИВ при высоких плотностях и различных концентрациях.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на семинарах в Российском Федеральном Ядерном Центре – Всероссийском научно – исследовательском институте экспериментальной физики (Саров), Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований (Дубна), в Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва), в Координационно-исследовательском центре по проблеме мюонного катализа и экзотических квантовых систем (Москва), в Научно – исследовательском институте физики при С.-Петербургском Университете (Санкт-Петербург), на ПО "Маяк" (Озерск), а также на Международной конференции по мюонному катализу μCF95 , Дубна 1995; 7-ой Международной конференции по материалам для реакторов синтеза, Обнинск, 1995; Международном рабочем совещании по мюонному катализу: интенсивному источнику нейтронов и его приложениям, Фраскати (Италия), 1996; Международном рабочем совещании по технологии микросфер, микрокапсул и лазерных мишеней, Москва, 1997; Международной конференции по экзотическим атомам, молекулам и мюонному катализу, Монте Верита (Швейцария), 1989; Международном семинаре "Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях. ПРИТ-99", Саров, 1999; 6-ой и 7-ой Международной конференции "Водородное материаловедение и химия гидридов металлов", Кацивели, 1999 и Алушта 2001; Первом международном семинаре "Безопасность и экономика водородного транспорта. IFSSENT-2000" Саров, 2000; Международном симпозиуме "Научные исследования с использованием трития и связанная с этим техника", Вако (Япония), 2000; 9 Международное рабочее совещание "Рециклинг водорода в материалах, контактирующих с плазмой в реакторах синтеза", Аргон, (США), 2000; Международном семинаре "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-01", Саров, 2001; Международной конференции "Мюонный катализ и связанные экзотические атомы. $\mu\text{CF} 01$ ", Шимода (Япония), 2001; 51-м Совещании по ядерной

спектроскопии и структуре атомного ядра, Саров, 2001; 6-ой Международной конференции по тритиевой науке и технологии, Цукуба (Япония), 2001.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 23 в журналах: *Hyperfine Interactions* – 7, *Journal of the Moscow Physical Society* – 4, ПТЭ – 2, *Journal of Nuclear Materials* – 1, *International Journal of Hydrogen Energy* – 1, *Fusion Science and Technology* – 2, *Материаловедение* – 3, *Вопросы атомной науки и техники* – 2, *Известия РАН. Серия физическая* – 1. Две работы опубликованы в трудах РФЯЦ-ВНИИЭФ. Получено 4 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения и включает в себя 193 страницы, 101 рисунок, 11 таблиц и 171 наименование цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость проведения исследований МК. Сформулирована цель работы, обоснована ее актуальность, научная новизна, практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту, и приведено краткое содержание работы.

Первая глава носит вводный характер. Дано представление о физической сущности МК в смесях ИВ, определены критические параметры процесса МК, требующие дальнейшего систематического изучения. Приведен обзор экспериментального оборудования, в части касающейся систем тритиевого обеспечения и мишеней, использовавшегося для исследований МК к началу этой работы. К этому времени были измерены основные параметры цикла МК. Однако, эти измерения носили незаконченный характер, оставался ряд вопросов, связанных с расхождением некоторых экспериментальных результатов, полученных различными экспериментальными группами (например, температурная зависимость коэффициента прилипания - ω_s , полученная в LAMPF и не нашедшая подтверждения в работах других групп). Существовало отличие ряда экспериментальных данных от теоретических. За исключением работ LAMPF (которые по настоящий день подвергаются многочисленной критике за множество методических погрешностей), все остальные эксперименты выполнены либо при низких

плотностях и диапазоне температур до 400К, либо в жидкости и твердых смесях ИВ в диапазоне температур 15-23К. Бурное начало (с 1979г.) работ с тритием мотивировалось теоретическими предсказаниями группы Л.И. Пономарева, подтвержденными экспериментально в Дубне группой В.Г.Зинова, об увеличении числа циклов МК, инициируемых одним мюоном, на два порядка величины, что открывало практическую возможность использования МК для получения энергии. Желание быстрого получения эмпирического ответа побудило начать эксперименты с тритием во всех научных центрах, имеющих мюонные пучки. При этом, проблема радиационной безопасности работ с тритием отходила на задний план. В результате эксперименты проводились либо с мишенями, заполняемыми D/T смесью в ближайших специализированных организациях, имеющих соответствующее оборудование и технологии (LANL, JAERI), а затем мишени транспортировались на мюонные каналы (LAMPF и KEK, соответственно), где проводились минимальные манипуляции с этими мишенями (охлаждение / нагрев). Либо "на скорую руку" были созданы системы газового обеспечения, условия радиационной безопасности работ на которых, оставляли желать лучшего (PSI). В первом случае это приводило к получению неоднозначных физических результатов из-за неопределенности с чистотой смеси, неточным знанием молекулярного состава и т.п., а во втором - к радиационному облучению персонала и, соответственно, скорому прекращению работ с тритием. Единственная радиационно-безопасная установка для работ с тритием была создана группой К. Нагамине в RAL (работа на установке с тритием была начата за 7 месяцев до начала аналогичных работ в Дубне на установке ТРИТОН). Однако, технические характеристики этой установки намного ниже, чем установки ТРИТОН: максимальное количество трития – 1.5кКи, давление ниже атмосферного, рабочая температура мишени 12-23К.

Показана необходимость создания *нового* радиационно-безопасного оборудования для работ с тритием на фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

Во второй главе описан комплекс подготовки газовой смеси (КПГС) [1]. КПГС предназначен для обеспечения безопасного проведения работ с тритием в количествах до 10 кКи при подготовке смеси заданного изотопного состава при содержании примесей с $Z > 4$ - не более 10^{-7} об. долей, подаче ее в мишень и утилизации после завершения работ.

Общим требованием к созданию установок высокого давления исследовательского класса для работы с тритием в количествах, превышающих 10Ки, и в условиях, специально не приспособленных для этих целей, являлось обеспечение радиационной

безопасности. С этой целью на любом возможном пути проникновения трития в атмосферу обеспечено три рубежа защиты для элементов установки, находящихся под давлением трития выше атмосферного, и два рубежа для остальных коммуникаций - при низких (до 10ККи) активностях трития или пониженных давлениях тритийсодержащей среды [1-7].

Работы по созданию комплекса были начаты в сентябре 1995г., а в декабре 1996г. комплекс был смонтирован в низкофоновой лаборатории фазотрона ЛЯП ОИЯИ, где, начиная с 1997г., используется в составе установки ТРИТОН для систематических исследований явления МК в широком диапазоне температур, плотностей (давлений) и соотношений молекулярного состава ИВ.

В основу получения высокого давления ИВ в мишенях для исследования процессов МК положен принцип криогенного заполнения мишеней с последующим их нагревом. Кроме того, имеется возможность прямого компримирования исследуемой смеси ИВ от металлгидридных генераторов [2,8]. В работе, в основном, использовалось криогенное заполнение. Это способ заполнения позволяет получать в мишенях давление ИВ вплоть до нескольких тысяч атмосфер и в то же время позволяет максимально обезопасить процесс заполнения и избежать больших потерь рабочего газа в питающих коммуникациях, что очень важно с точки зрения обеспечения экологической нормы (10кКи) по тритию, принятой для ОИЯИ. При таком способе заполнения довольно просто обеспечить диффузионную очистку рабочего газа до уровня 10^{-7} об. долей по примесям, применяя диффузионные фильтры на основе палладиевых сплавов [9]. Основные газовые коммуникации КППС рассчитаны на рабочее давление 20 МПа (рабочее давление цельнометаллических прогреваемых сильфонных вентилях). Общий вид комплекса представлен на рис.1.

Подготовка смеси необходимого изотопного состава производится путём последовательного измерения количества определенного ИВ волнометрическим методом в калиброванном мерном объеме с последующей адсорбцией отмеренного газа урановым смесевым источником. После чего смесь заданного изотопного состава подается в мишень либо через палладиевый фильтр, либо непосредственно из источника.

Анализ молекулярного состава смеси осуществляется специально разработанным для этой цели газовым радиохроматографом, состоящим из детектора теплопроводности (катарометра) и малогабаритной ионизационной камеры [1, 10]. Разделение ИВ производится на хроматографической колонке длиной 3м, содержащей гранулы Al_2O_3 , покрытые $Fe(OH)_3$. Колонка работает при температуре жидкого азота. В качестве газа-

носителя используется неон. Расход газа носителя составляет ~ 100 см³/мин. Суммарное время анализа не превышает 30мин.



Рис. 1. Общий вид КППС.

Для повышения точности измерений и чувствительности к тритийсодержащим молекулам в качестве независимого метода используется ионизационная камера объемом 5см³ и фоновым током $\sim 10^{-15}$ А. Кроме того, ионизационная камера позволяет измерять абсолютное количество трития в анализируемой смеси и его распределение между изотопными молекулами ИТ, ДТ и Т₂, что дает возможность проводить независимую калибровку прибора.

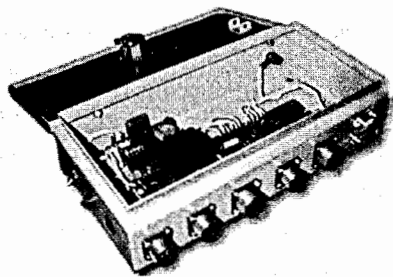
Выбранное в процессе разработки радиохроматографа сочетание его конструктивных элементов и режимов работы, позволяет получать хорошее разрешение всех шести пиков от изотопных молекул (рис. 2.), а также гелия (при его наличии). Точность измерений молекулярного состава составляет $\pm 0.5\%$ отн.

Утилизация отработанной смеси осуществляется, в основном, её адсорбцией на двух урановых ловушках ёмкостью по водороду 200л каждая. При этом ловушки могут работать или как гидридные насосы-геттеры, или в "прокачном" режиме. В последнем случае отработанная смесь ИВ прокачивается через активированный уран одной либо обеих ловушек с помощью форвакуумного насоса. ИВ поглощаются ураном, однако различные газообразные примеси, содержащие следы трития, все же проходят через урановые ловушки. С этой целью выхлоп форвакуумных насосов осуществляется на

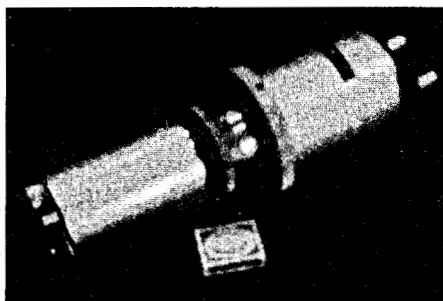
установки (имеется более 20 блокирующих команд на штатное действие оператора либо СКУ), так и подсистемой дозиметрического контроля по тритию.

На начальном этапе для измерения объемной активности трития в газовых коммуникациях и воздухе рабочей зоны использовались промышленные радиометры газов РГБ-06. Однако радиометры РГБ-06 не имеют средств для включения в автоматизированные системы контроля и управления и к моменту создания КПГС его промышленное производство было прекращено. Поэтому, в процессе модернизации СКУ, нами был разработан радиометр трития многоканальный автоматизированный РГБ-06МА, в котором обеспечена совместимость с унифицированными блоками детектирования БДГБ-02П и возможность интеграции в системы управления установок. Радиометр состоит из микропроцессорного контроллера радиационной обстановки (КРО), к которому можно подключить два промышленных блока детектирования БДГБ-02П (рис. 3.).

Радиометр РГБ-06МА прошел процедуру утверждения типа средства измерения (получен сертификат RU.C.38.046.A №11019 от 01.11.2001). Он обеспечивает измерение



а)



б)

Рис.3. Общий вид: а)- контроллера радиационной обстановки КРО; б) блока детектирования БДГБ-02П.

объемной активности по тритию в диапазоне от $5 \cdot 10^5$ Бк до $5 \cdot 10^{10}$ Бк с ионизационной камерой объемом 1 л, и от $5 \cdot 10^4$ Бк до $5 \cdot 10^9$ Бк с камерой объемом 10 л. Предел допускаемой относительной основной погрешности измерения объемной активности трития не более $\pm 25\%$, а при градуировке и проверке по гамма излучению ^{60}Co - не более $\pm 20\%$.

Радиометр может работать как в автономном режиме, так и в составе многоканальной автоматизированной системы радиационного мониторинга. При работе в автономном режиме обеспечиваются функции измерения объемной активности и

пороговой сигнализации. При работе в составе многоканальной системы измерительные блоки контроля радиационной обстановки объединяются в локальную сеть двухпроводной линии связи по стандарту RS-485, который обеспечивает надежную связь управляющей ЭВМ с локальными постами в условиях промышленных помех на удалении до 250м.

Начиная с 1997г., с использованием КПГС проведен цикл работ с различными типами мишеней. При этом давление тритийсодержащей смеси достигало 200МПа, а температура – 10-800К. За это время в КПГС было использовано порядка 500кКи трития. КПГС работал надежно, превышения фона по объемному содержанию трития в рабочей зоне и вытяжной вентиляции зафиксировано не было.

В третьей главе приводится описание конструкций мишеней высокого давления, их конструктивные решения и исполнение составных частей и систем.

Для проведения исследований МК при высоких плотностях ИВ и в широком диапазоне температур нами была разработана серия мишеней высокого давления: тритиевая мишень высокого давления (ТМВД) [11,12], дейтериевая мишень высокого давления (ДМВД) [13] и тритиевая мишень сверхвысокого давления (ТМСД). В основу конструкции всех этих мишеней положены следующие принципы [1-4, 11-16]: наличие трёх рубежей защиты на всех возможных путях утечек ИВ в атмосферу; дублирование запорной арматуры; исполнение ампулы в виде автофритированного сосуда с полостью между внутренним и наружным корпусом ампулы для сбора диффундирующего водорода; возможность криогенного и прямого компримирования ИВ; высокая (на уровне $R \geq 0.9^{(6)}$) прочностная надёжность при уровне доверительной вероятности 0.95.

Поскольку основные технические решения - общие для всех мишеней и их модификаций, то в диссертационной работе более подробно приведено описание первой из них, а именно, ТМВД [11,12], описание остальных – дано лишь в части, касающейся их отличительных признаков. На примере ТМВД дано представление об объёме работ, проводимых при создании мишени: прочностные и тепловые расчёты, прочностная отработка и ресурсные испытания, определение прочностной надёжности, проведение функциональных испытаний [17]. Для каждого типа мишени порядок работ, их содержание может слегка отличаться, но общая методика проведения аттестации мишени не изменяется.

ТМВД (рис. 4.) - это радиационно-безопасный комплекс устройств, позволяющих сжигать требуемое по условиям эксперимента количество смеси ИВ в ампуле при 20К с

последующим её нагревом до заданной температуры, но не более 800К, получать и удерживать в ампуле объемом 16,5см³ в течение 400 часов давление 160 МПа, улавливать диффундирующие при нагреве ампулы ИВ.

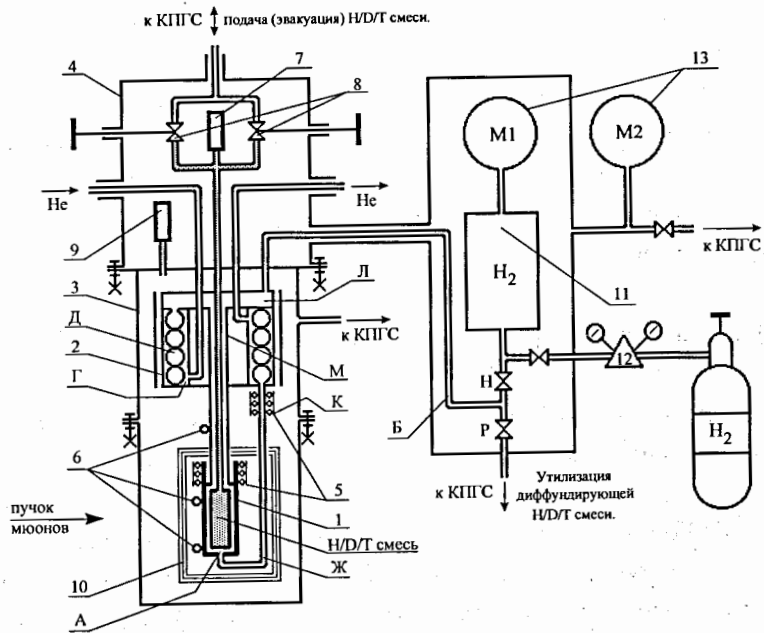


Рис. 4. Схематическое изображение ТМВД: 1 - ампула; 2 - охладитель; 3 - кожух; 4 - колпак; 5 - нагреватели; 6 - термопары; 7 - датчик давления; 8 - вентили высокого давления; 9 - преобразователь манометрический термопарный; 10 - экраны теплоотражающие; 11 - ёмкость водородная; 12 - редуктор водородный; 13 - мановакуумметры.

Ампула 1 и охладитель 2 расположены в кожухе 3, внутренняя полость которого соединена с вакуумной системой КПГС. В нижней части кожуха выполнена выборка с целью минимизации количества металла в зоне мюонного пучка. На кожух установлен колпак 4. Его внутренняя полость сообщается с боксом КПГС. Во внутренней полости колпака расположены вентили высокого давления 8 ($P_{\text{раб}}=500$ МПа) и тензометрический датчик давления 7. Вентили обеспечивают перекрытие внутреннего объема ампулы после охлаждения в ней рабочей смеси и регулируемый перепуск этой смеси из ампулы в КПГС при её эвакуации. Управление вентилями выведено на наружную поверхность колпака. Нагрев ампулы обеспечивается нагревателем 5, размещённым внутри шестислойных радиационных теплоотражающих экранов 10. Радиационные экраны позволяют получить

достаточно равномерное распределение температуры ампулы и препятствуют нагреву кожуха выше 343 К.

Охлаждение рабочей смеси проводится в две стадии: сначала в полостях Д и Л охладителя 2 сжижается промежуточный хладагент (водород) путем прокачки жидкого азота/гелия через полость Г охладителя, затем жидкий водород из полости Д под собственным весом опускается по трубке Ж и заполняет полость А ампулы, откуда по трубке М направляется в полость Л охладителя и стекает в полость Д на повторное охлаждение, реализуя, таким образом, режим циркуляции. После завершения процесса охлаждения промежуточный хладагент эвакуируется и полости А, Л вакуумируются системой утилизации КПГС, обеспечивая тем самым улавливание диффундирующих при высоких температурах через стенку ампулы ИВ.

В процессе охлаждения ампулы промежуточный хладагент контактирует с участками магистралей, загрязнёнными

диффундирующим тритием. Поэтому для его размещения используется отдельная водородная ёмкость 11, помещённая внутри вакуумного защитного кожуха.

В процессе функциональной и прочностной отработки, аттестации ТМВД было получено, что: несущая способность ампулы составляет 378 МПа, при этом всегда происходит разрушение первого рубежа защиты, а второй остается герметичным; нижняя остается достоверной граница показателя прочностной надёжности $> 0,9^{(6)}$, при уровне

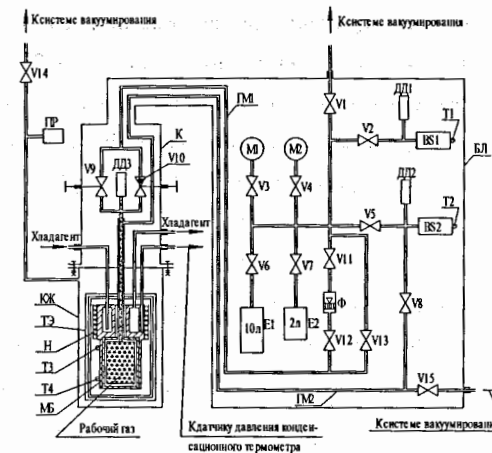


Рис. 5. Принципиальная схема ДМВД: МБ-мишенный блок; КЖ-вакуумный кожух; К-колпак; Н-нагреватель; Т1...Т4-термопары; ДД1, ДД3(0-250МПа), ДД2(0-60МПа)-датчики давления, V1...V14-вентили; V15-вентиль вакуумный; ПР-измеритель вакуума (PKR 261); M1 (0-1МПа), M2 (0-25МПа)-манометры; Ф-диффузионный фильтр; E1, E2-мерные ёмкости; ТЭ-теплоотражающие экраны; BS1-термодесорбционный металлгидридный источник на основе ванадия; BS2-термодесорбционный металлгидридный источник на основе урана; БЛ-блок; ГМ1, ГМ2-газовые магистрали

доверительной вероятности 0,95; ресурс работы при максимальных нагрузках – 400 часов; время охлаждения от комнатной температуры до 20К – 2 часа, при необходимом количестве жидкого гелия 10 л; отсутствуют утечки ИВ через второй рубеж защиты.

В отличие от ТМВД, являющейся частью КПГС, ДМВД (рис. 5.) [13] представляет собой комплекс устройств, который обеспечивает её полное автономное функционирование, а именно:

- а) генерирование диффузионно-чистого D_2 из термодесорбционных металлогидридных источников BS1, BS2 на основе ванадия и урана, соответственно;
- б) охлаждение, нагрев и поддержание заданной температуры ампулы мишени в диапазоне (80-800)К;
- в) заполнение ампулы дейтерием при температуре 80-300К.

В отличие от ТМВД, ампула и охладитель ДМВД конструктивно объединены в единый узел – мишенный блок. Это позволило сократить габариты мишени в вертикальном направлении. При применении в качестве хладагента жидкого гелия возможна её эксплуатация при температурах от 20 до 800К. Конструкция ампулы ДМВД аналогична устройству этого элемента в ТМВД, различие заключается лишь в габаритах и оформлении нижней части. Несущая способность ампулы, по результатам её прочностных исследований, составляет 260МПа, что подтверждает её требуемую прочностную надёжность ($R \geq 0.9^{(5)}$) при уровне доверительной вероятности 0.95).

Одним из основных параметров МК, от которого зависит скорость и множественность цикла, является плотность смеси ИВ. Для проведения исследований МК при плотностях выше 1.0 LHD разработаны две модификации ТМСД (рис. 6) с расширенным температурным диапазоном. ТМСД обладает следующими техническими характеристиками (в скобках приведены характеристики модифицированного варианта ТМСД): объём ампулы мишени – 18 (10) см³ при её внутреннем диаметре 15мм; температурный диапазон эксплуатации –20-800К (10-300К); максимальное рабочее давление – 250МПа; ресурс – 600 часов; заполнение - криогенное при температуре 20К и давлении не более 0.5МПа; поддержание температуры в диапазоне 10-300К с применением криорефрижератора 4.2GM, фирмы LEYBOLD; поддержание температуры в диапазоне 300-800К осуществляется системой нагрева мишени, при этом используется криогенное заполнение мишени (температура 20К достигается с помощью проточного гелиевого криостата, установленного в верхней части ампульного блока. Криостат

аналогичен, применявшемуся в ДМВД [13]); подача рабочего газа и утилизация диффундирующего трития обеспечивается КПГС установки ТРИТОН.

Для обеспечения хорошего теплового контакта между криогенным блоком и ампулой мишени при его монтаже - демонтаже применяется плавкая вставка 11 (рис. 6.) на основе сплава Вуда.

Второй конструктивной особенностью ТМСД, отличающей её от предыдущих мишеней и позволившей поднять рабочее давление до 250 МПа, является изменение конструкции крышки. В ТМСД плоский вариант крышки заменен на сферический.

Кроме того, с целью повышения точности регистрации рабочих параметров мишени (давление и температура) в конструкцию ТМСД был установлен дополнительный, отсекаемый с помощью вентиля высокого давления, датчик с рабочими параметрами 0-25МПа, измерение температуры в области 10-300К осуществлялось с помощью двух кремниевых термодиодов фирмы LEYBOLD, расположенных в верхней и нижней части ампульного блока. Это позволило проводить регистрацию температуры в диапазоне 4-100 К с точностью

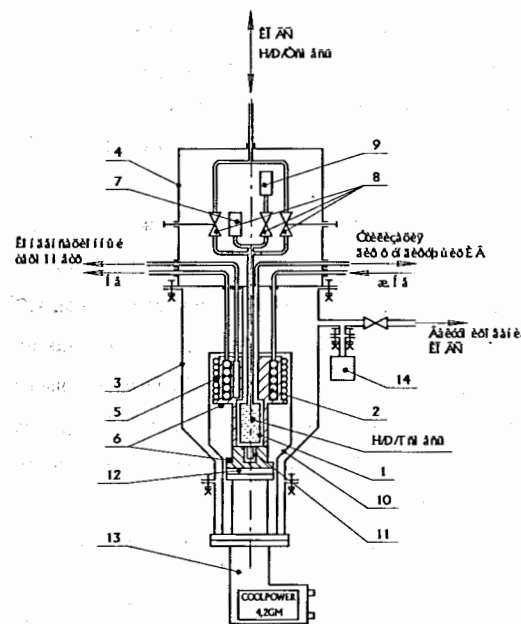


Рис. 6. Принципиальная схема ТМСД: 1 – ампула; 2- проточный охладитель; 3- корпус; 4- колпак; 5- нагреватель; 6- кремниевый термодиод; 7- датчик давления (250МПа); 8- вентиль высокого давления; 9- датчик давления (25МПа); 10- радиационный экран; 11- стыковочный узел; 12- печь; 13- головка криорефрижератора; 14- вакуумный датчик.

±1К, выше 100 К с точностью ±1%.

Остальные изменения конструкции ТМСД по отношению к предыдущим мишеням незначительны с точки зрения её функционирования и были связаны с повышением её радиационной безопасности и технологичности при монтаже – демонтаже отдельных элементов мишени.

Все типы мишеней и их модификаций в полной степени удовлетворяют требованиям проведения физических экспериментов по исследованию МК в плотных смесях ИВ. В ходе эксплуатации каких-либо отклонений в функционировании мишеней не наблюдалось.

В четвертой главе приведены результаты выбора КМ, для его использования в конструкциях основных элементов КПГС [1] и мишеней [11-13], на основании изучения их длительной стойкости в среде водорода [18-20] и водородопроницаемости (ВП) [18-21]. Для подтверждения правильности нашего выбора и обоснования ресурса работы КМ в тритийсодержащих средах, нами было создано соответствующее оборудование и отработана методика ускоренного накопления ^3He в КМ путем выдержки образцов из исследуемых материалов в среде газообразного трития при высоких давлениях и температурах [22-24]. Данное оборудование создано на базе модифицированного КПГС [1].

КМ наиболее ответственных элементов КПГС и мишеней должен обладать высокими механическими свойствами: жаропрочностью, стойкостью к воздействию водорода, длительной прочностью. В то же время КМ должен быть технологичным, т.е. иметь хорошие свариваемость и обрабатываемость резанием, а также доступным как по цене, так и масштабам его производства. Из ряда КМ, которые ранее были исследованы нами на предмет их применимости в среде водорода высокого давления [18-20], был выбран сплав ХН40МДТЮ-ИД, который применяется для изготовления химической аппаратуры, подвергающейся воздействию высокоагрессивных сред при повышенных температурах и механических напряжениях. Этот сплав относится к классу аустенитных жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов.

В работе приводятся результаты исследований водородостойкости сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений, которые проводились на стандартных цилиндрических образцах $\varnothing 3\text{мм}$ тип IV, № 9 ГОСТ 1497-84 и на тонкостенных трубчатых образцах, чувствительная длина которых составляла $\sim 50\text{мм}$, наружный диаметр - $\varnothing 10\text{мм}$, толщина стенки рабочей части - $0,75\text{мм}$. Прочность сварного соединения сплава, выполненного электронно-лучевой сваркой, изучалась на цилиндрических образцах $\varnothing 3\text{мм}$, вырезанных из сварных цилиндрических втулок, термообработанных до сварки.

Испытания на растяжение стандартных цилиндрических образцов и сварных образцов проводились на установке для испытания на растяжение в среде водорода [18-20]. При этих испытаниях определялись: временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, условный предел

текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и относительное сужение ψ , а при испытаниях сварных образцов - временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$.

Испытания в условиях сложно-напряженного состояния проводились на трубчатых образцах [18,20]. При этом определялось напряжение (давление) разрушения $\sigma_{\text{разр}}$. В процессе этих испытаний имитировалось воздействие эксплуатационных факторов на КМ ТМВД [11].

Степень воздействия водорода на материал оценивалась путем сравнения характеристик ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , $\sigma_{\text{разр}}$), полученных при испытаниях образцов, выдержанных и испытанных в среде водорода, с аналогичными характеристиками, определенными на образцах, испытанных в среде гелия.

В результате исследований КМ были получены новые экспериментальные значения длительной (на базе 80 часов) прочности сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений при воздействии водорода высокого давления до 150МПа в диапазоне температур $20 - 600^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний показывают, что длительная выдержка в среде водорода при 20°C оказывает небольшое влияние на прочностные характеристики сплава ХН40МДТЮ-ИД (уменьшение величины $\sigma_{\text{в}}$ составляет $\sim 6\%$) и существенно большее влияние на характеристики пластичности (δ , ψ). С повышением температуры испытаний степень снижения временного сопротивления под воздействием водорода возрастает до $\sim 19\%$ (при 600°C), а величина условного предела текучести в этих же условиях испытаний оказывается практически нечувствительной к водородному воздействию. Температурная зависимость характеристик пластичности сплава ХН40МДТЮ-ИД в среде водорода имеет минимум при температуре 300°C , при этом во всем исследованном диапазоне температур величины относительного удлинения δ и относительного сужения ψ более чувствительны к воздействию водорода, чем $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$.

Водород, практически, не оказывает влияния на прочность сварного соединения сплава ХН40МДТЮ-ИД. По-видимому, это связано с большей пластичностью металла сварного шва по сравнению с пластичностью основного металла. Измерение относительного сужения после разрыва сварных образцов показало, что величина ψ ($34 \div 58\%$) существенно выше величины ψ цельных образцов ($5 \div 16\%$), испытанных также в условиях воздействия водорода.

Результаты данных исследований показывают, что прочностные свойства сплава ХН40МДТЮ-ИД сохраняются на достаточно высоком уровне при воздействии водорода высокого давления в течение, по крайней мере, 200 часов.

Однако остается открытым вопрос о применимости этих результатов для КМ, работающих в тритийсодержащих средах. Для ответа на этот вопрос было создано оборудование для ускоренного старения КМ в тритии [22-25]. Методика такого старения известна и заключается в выдержке КМ при повышенных давлениях и температурах трития. При этом, за счет повышенной растворимости трития в матрице КМ, при его радиоактивном распаде происходит накопление ^3He , концентрация которого определяется

как: $S_{\text{He}} = 2 \cdot S_0 \cdot e^{\frac{H_s}{R \cdot T}} \cdot \sqrt{P} \cdot \lambda \cdot t$, где S_0 - константа растворимости трития, H_s - теплота растворения, T - абсолютная температура, R - газовая постоянная, P - давление трития, λ - постоянная распада, для трития $\lambda = 1,791 \cdot 10^{-9} \text{c}^{-1}$, t - время выдержки КМ в тритии. Из этого соотношения следует, что, исключая время, параметрами, которыми можно регулировать концентрацию гелия в матрице КМ, являются температура и давление. Такой метод наработки ^3He в матрице КМ называется методом "тритиевого трюка".

Согласно описанной выше методике было проведено насыщение ^3He образцов стали 12X18Н10Т и сплава ХН40МДТЮ-ИД. Образцы выдерживались в специально разработанном контейнере, представляющем собой радиационно-безопасный автоскрепленный двухслойный сосуд высокого давления с вакуумированным водородным барьером [25], при давлении трития $\sim 50 \text{МПа}$ и температуре $\sim 873 \text{K}$ в течение 700 и 1400 часов. В результате выдержки образцов в течение 700 часов содержание ^3He в стали 12X18Н10Т и сплаве ХН40МДТЮ-ИД, оцененное расчётным образом, составляет ~ 120 -500 аррм. Разброс значений содержания ^3He в КМ обусловлен нестабильностью условий выдержки образцов в тритии из-за градиента температуры внутри контейнера, технологическими перерывами и т.п. Такая большая неопределённость в оценке количества ^3He в образцах КМ после их тритирования потребовала создания оборудования и методики количественного определения ^3He в КМ.

Такое оборудование было создано на базе модернизированного газового анализатора «Eltra», позволяющего определять содержания H_2 и O_2 в металлах (рис.7.). Суть метода заключается в плавлении образца КМ при температуре 3000°C в токе газа носителя с последующим анализом содержания газов, выделившихся в результате плавления. Анализ ^3He осуществляется детектором по теплопроводности. Кроме того, прибор был дооснащен ионизационной камерой, что позволило определять содержание остаточного трития в матрице КМ. Прибор позволяет определять содержание ^3He с чувствительностью 10^{-6}г , трития с чувствительностью 10^{-5}Ки . Анализ партии образцов, выдержанных в тритии при

500°C и 500атм в течение 700 часов и прошедших затем детритизацию методом изотопного замещения, показал, что исследуемый КМ содержит 160 аррм ^3He и $4 \cdot 10^{-5} \text{Ки/г}$ трития.

Детритизация осуществлялась с целью получения образцов пригодных для работы в помещении третьего класса. Это позволяет провести всесторонние исследования этих образцов в лабораториях других организаций неприспособленных для работ с тритием.

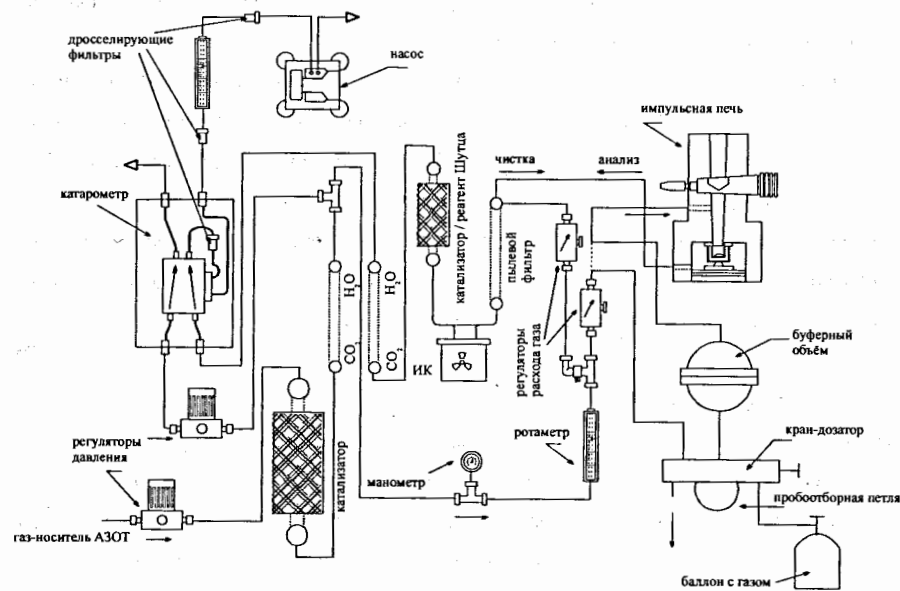


Рис.7. Схема установки для определения объёмного содержания ^3He и трития в КМ.

Следующим основным вопросом при выборе КМ был вопрос о его ВП. Диффузионные утечки ИВ из элементов конструкций, работающих при высоких давлениях ИВ и высоких температурах, приводят, с одной стороны, к изменению количества смеси в ампуле во время исследований процессов МК, а с другой – к выходу трития за пределы ампулы, его потерям и возможному ухудшению радиационной обстановки. Поэтому основной задачей исследований был выбор материала с наименьшими значениями ВП и поиск защитных покрытий, способных ее уменьшить.

Нами были проведены исследования проницаемости изотопами водорода перспективных жаропрочных водородостойких сплавов на никелевой основе: ЭП741НП(ХН52МВБКТЮНП), ЭП99-ИД(ХН50МВТЮР-ИД) и ЭП543У-ИД(ХН40МДТЮ-ИД) [18-21] и ряд других материалов. По совокупности результатов этих

исследований и исследований водородостойкости КМ в качестве КМ основных элементов КППС и мишеней был выбран сплав ЭП543У-ИД(ХН40МДТЮ-ИД). Для этого материала были также проведены исследования ВП его сварных соединений.

В качестве защитного покрытия нами было предложено покрытие на основе нитрида титана из-за его технологичности и доступности в условиях опытного производства ВНИИЭФ. Покрытие нитридом титана осуществлялось методом магнетронного распыления на установке "Булат". Всесторонние исследования ВП этого покрытия подтвердили обоснованность сделанного выбора и его перспективность.

В результате выполненных работ впервые были получены параметры ВП как сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений, так и сплава с защитным покрытием из нитрида титана в диапазоне температур до 700°C. Найдено, что при температуре 400-500°C для покрытия из нитрида титана существует излом кривой проницаемости, связанный с изменением механизма транспорта водорода через это покрытие. Применение защитного покрытия из нитрида титана позволяет снизить проницаемость водорода через сплав ХН40МДТЮ - ИД более чем на порядок величины.

В пятой главе изложены методика, оборудование и результаты исследований системы "ванадий – ИВ" при высоких давлениях. Приведены, полученные в работе диаграммы состояния этой системы в координатах давление – температура – концентрация (P-T-C) в диапазоне давлений до 500МПа. Описана конструкция ванадиевого металлгидридного источника для создания высокого давления ИВ, включая тритий, вплоть до 500МПа.

На начальной стадии работ по созданию КППС [1-4] встал вопрос о применимости имеющихся во ВНИИЭФ механических компримирующих устройств для создания высокого (>100МПа) давления ИВ. Поскольку одним из основных требований, предъявляемых к ИВ, является содержание в них примесей с $Z > 4$ на уровне 10^{-7} об. долей, то стало ясной бесперспективность их применения. В связи с этим было предложено использовать источники высокого давления на базе гидрида ванадия [2, 8]. Выбор гидрида ванадия основывался на сочетании его высокой удельной ёмкости по ИВ и сравнительно низких температур, требующихся для получения высоких давлений. Поскольку получение высоких давлений в ванадиевых источниках ожидалось при относительно низких температурах, а заполнение источников предполагалось проводить диффузионно-чистыми ИВ после высоковакуумной активации ванадия и его многократной тренировки в среде диффузионно-чистых ИВ, то ожидалось, что содержание примесей с $Z > 4$ в десорбируемых

из источника ИВ будет не ниже 10^{-7} об. долей. Кстати, это было подтверждено впоследствии в экспериментах по исследованию процессов МК при прямом компримировании ИВ в мишени от источников ИВ. Последним крупным преимуществом использования гидрида ванадия в качестве источника ИВ была возможность создания малогабаритной, радиационно-безопасной конструкции, по типу предложенной в работах [11-14, 25].

Однако, к началу работ по созданию КППС имеющихся в литературе данных о давлениях, создаваемых при нагревании гидрида ванадия, и о зависимости этого давления от температуры оказалось недостаточно для разработки источников ИВ высокого давления. Все известные данные о равновесных давлениях десорбции изотопов водорода над гидридом ванадия были получены в диапазоне давлений до ~ 90 МПа. Другим ясным из литературных данных моментом является величина изотопного эффекта при термическом разложении гидрида ванадия. Всё это требовало проведения исследований системы "ванадий – ИВ" в широком диапазоне давлений, и особенно - при давлениях более 90МПа.

Для этих целей было создано две установки с рабочими давлениями до 20МПа и 500МПа, на которых были проведены работы [26-29] по выяснению режимов активации ванадия, режимов его насыщения ИВ до дигидридной фазы и измерению равновесных давлений сорбции и десорбции в широком диапазоне давлений и температур.

На рис. 8. приведены некоторые из полученных P-T-C диаграмм для систем гидрид ванадия-водород и дейтерид ванадия-дейтерий, соответственно [27-29]. Кривые при других температурах имеют аналогичный вид и поэтому здесь не приведены.

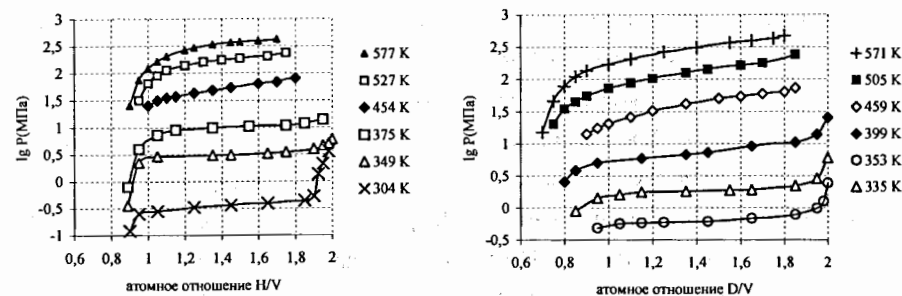


Рис.8. Изотермы давление – состав для систем H/V и D/V.

Из рис.8 видно, что полученные изотермы давление – состав имеют "плато" давления и представляют собой типичные изотермы разложения гидрида металла в

двухфазной области. По этим изотермам были найдены зависимости равновесных давлений десорбции от температуры в координатах $\lg P - 1/T$. Такая зависимость для дейтерида ванадия при атомном отношении $D/V=1,5$ приведена на рис. 9. Для обработки полученных экспериментальных данных зависимости равновесных давлений десорбции от температуры использовалось уравнение состояния, выведенное для водорода в области давлений до 100 ГПа и температур до 1000 К. Оно является эмпирической модификацией уравнения состояния реальных газов Ван-дер-Ваальса в виде: $[p+a(p)/V^n][V-b(p)]=RT$.

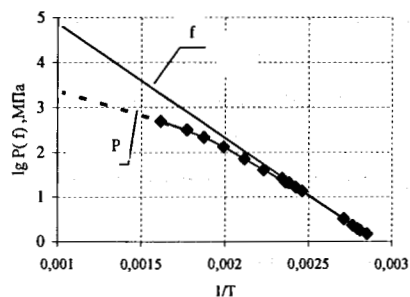


Рис.9. Зависимость $\lg P$ ($\lg f$) от $1/T$

Из рис. 9 видно, что зависимость $\lg P$ от $1/T$ в области давлений более ≈ 40 МПа перестают быть линейными. Причиной нелинейности является зависимость термодинамических параметров водорода от давления. Если в области низких давлений для определения термодинамических параметров можно использовать зависимость равновесных давлений в области "плато" от температуры, то в области высоких давлений равновесное давление должно быть преобразовано в летучесть. Связь между летучестью и давлением имеет вид: $\lg(f) = \lg(P) - F(P)/2,303 \cdot R \cdot T$, где: f – летучесть, P – давление, R – универсальная газовая постоянная и $F(P)$ – интеграл от 0 до P разности объемов 1 моля идеального и реального газов.

Для измеренных значений равновесных давлений были рассчитаны соответствующие значения летучести. Полученная для дейтерия зависимость $\lg(f)$ от $1/T$ (рис.9.) имеет линейный вид $\lg(f) = -2575/T + 7,4$. Для водорода $-\lg f(\text{МПа}) = -2212/T + 6,77$. Пользуясь найденными зависимостями летучести от температуры можно рассчитать равновесное давление ИВ над дигидридной фазой ванадия при произвольной температуре.

Приближенную оценку создаваемых с помощью гидрида ванадия давлений можно также сделать с помощью приведённых в работе [29] зависимостей равновесных давлений от температуры в области давлений $30 \div 500$ МПа. Для протия и дейтерия эти зависимости имеют, соответственно, вид: $H_2: \lg P(\text{МПа}) = -1665/T + 5,4$ и $D_2: \lg P(\text{МПа}) = -2024/T + 6,1$.

Проведённые измерения расширили область измеренных равновесных давлений десорбции по сравнению с литературными данными на ~ 2 порядка для протия и на $\sim 1,5$ порядка для дейтерия.

Полученные экспериментальные данные позволили создать серию ванадиевых источники ИВ высокого давления. На рис. 10. приведены принципиальная схема источника а) и его общий вид б) [20].

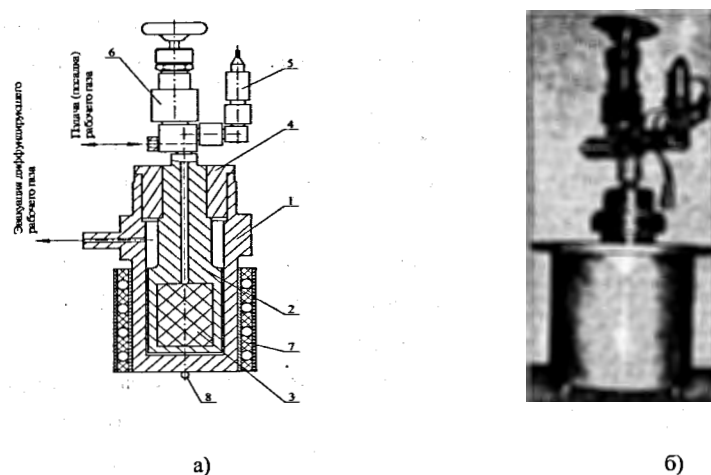


Рис. 10. Источник ИВ высокого давления на основе ванадия: а) принципиальная схема источника, б) общий вид: 1 – корпус; 2 – ампула; 3 – сорбент; 4 – крышка; 5 – датчик давления; 6 – вентиль высокого давления; 7 – электронагреватель; 8 – термомпара.

Источники этого типа используются: в КПГС [1], ДМВД [13], в работах по "ускоренной наработке" ^3He в матрице КМ [22-24], в составе установок для исследований равновесных давлений ИВ в системах "металл – ИВ" [26-29]. Кроме того, они активно используются в работах, проводимых по тематике РФЯЦ-ВНИИЭФ, например, для заполнения дейтерий - тритиевой смесью микромишеней для термоядерного синтеза с лазерным иницированием [30], измерения уравнения состояния дейтерия в области мегабарных давлений и ряде других работ.

В шестой главе изложены результаты исследований процессов МК в плотных D/T и $H/D/T$ смесях. Приведены параметры эксперимента, полученные зависимости скорости цикла от температуры, плотности и концентрации ИВ в смесях.

В 1997 – 2002 г.г. в ЛЯП ОИЯИ с применением КПГС [1] и различных типов мишеней [11-13, 31] были проведены эксперименты по изучению процессов МК в плотных смесях ИВ [32-39]. Параметрическая область проведённых экспериментов по плотности и температуре представлена на рис. 11. На самом деле каждой точке этой

диаграммы соответствует, как минимум, 4-5 измерений при различных концентрациях ИВ в исследуемой смеси.

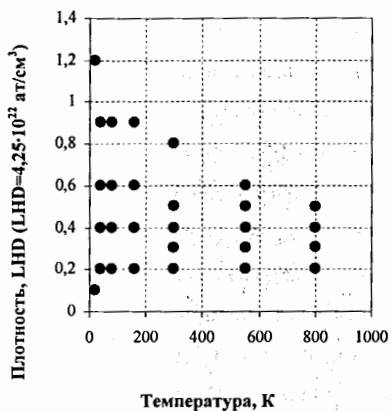


Рис. 11. Область МК экспериментов в плотных смесях ИВ.

фотография процесса МК. Из рисунка видно, что вход мюона в мишень, регистрируемый пропорциональным счётчиком 4 (рис. 12.) – это первое событие в канале CHANNEL 4. Затем идёт череда событий МК, результатом которой является выход нейтронов, регистрируемых в каналах CHANNEL 1 и 2, а их сумма в канале CHANNEL 3. Обрыв этих событий свидетельствует о прилипании мюона к ^4He , а последующий "всплеск" говорит о распаде мюона. Это же событие фиксируется счётчиком 4 – в канале CHANNEL 4. В данном конкретном событии

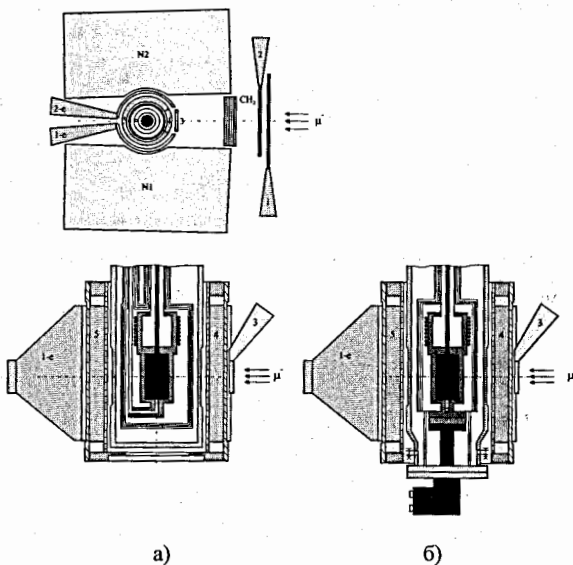


Рис. 12. Блок – схема эксперимента с тритиевой мишенью высокого а) и сверхвысокого б) давления.

Схема эксперимента с ТМВД [11-12] и ТМСД приведена на рис. 12. Мишень Т располагается в фокусе пучка отрицательных мюонов. Счётчики 1, 2 служат монитором пучка мюонов. Счётчики 3, 4 более детально выделяют фракцию мюонов пучка, которая, в основном, останавливается в мишени. Замедлитель CH_2 служит для обеспечения максимума остановок мюонов в водороде, сцинтилляционные счётчики 1-е, 2-е служат для выделения электронов распада мюона.

В проведённых экспериментах впервые была получена наглядная гистограмма процессов МК (рис. 13.), своего рода

зарегистрировано более 400 актов синтеза на один μ .

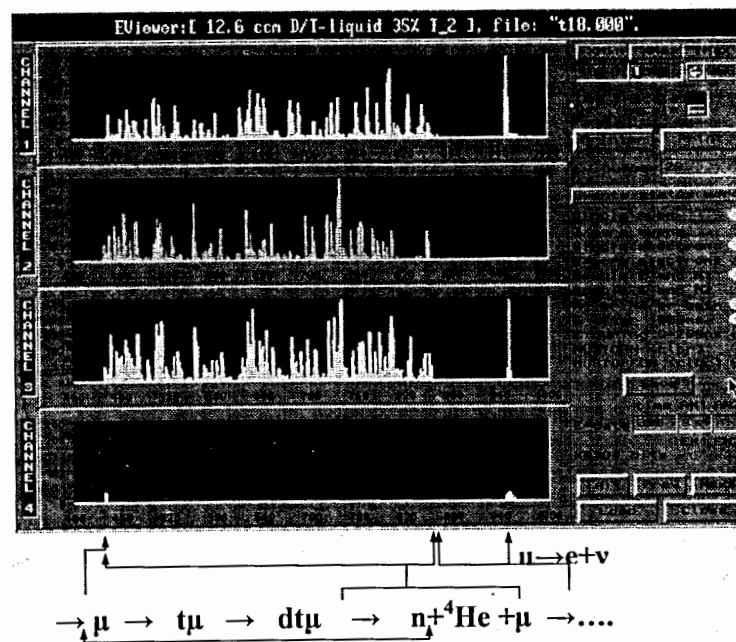


Рис. 13. Экспериментальные события МК в жидкой D/T смеси: CHANNEL 1 – нейтроны, зарегистрированные детектором N1 (см. рис.13.); CHANNEL 2 – нейтроны, зарегистрированные детектором N2; CHANNEL 3 – нейтроны, зарегистрированные детекторами N1 + N2; CHANNEL 4 – события, зарегистрированные пропорциональным счётчиком 4.

В ходе этих экспериментов были получены новые значения параметров цикла МК в двойной D/T смеси в диапазоне температур 20-800K и плотностей до 1.3 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси [32, 34, 36, 37].

Впервые были проведены систематические измерения параметров цикла МК в тройной H/D/T смеси ИВ в диапазоне температур 20-800K и плотностей до 0.9 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси [33-35, 38]. Сделан вывод, что количество актов синтеза, инициированных одним мюоном, уменьшается при добавке в D/T смесь протия. Высокая скорость образования $dt\mu$ - молекул из HD молекулы в H/D/T смеси, предсказанная теоретиками и подтвержденная

прямыми экспериментами, не может компенсировать потерь мюона за счёт высокой вероятности его прилипания к гелию.

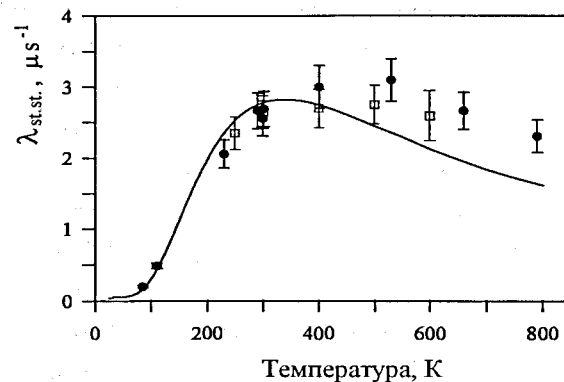
Не смотря на то, что эксперименты с двойными D/T и тройными H/D/T смесями проводились при высоких плотностях и температурах до 800К, экспериментальных значений параметров МК в D₂ при температурах более 400К не существовало. По этой причине, при обработке результатов экспериментов в двойных и тройных смесях, значения скорости образования ddμ - молекулы извлекались из результатов этих экспериментов. Для получения этих данных с использованием дейтериевой мишени высокого давления [13] нами были проведены экспериментальные исследования в дейтерии при температурах 300-800 К и давлениях до 150 МПа [39].

Таблица. Экспериментальные данные $\lambda_{dd\mu}$ и $\lambda_{1/2}$ в диапазоне температур 300-800К [39].

T, K	$\lambda_{dd\mu}, \mu\text{s}^{-1}$			$\lambda_{1/2}, \mu\text{s}^{-1}$
	Значение	Статистическая ошибка	Систематическая ошибка	
290 (4)	2.74	0.05	0.25	2.56 (0.25)
298 (4)	2.74	0.05	0.25	2.56 (0.25)
401 (10)	3.06	0.06	0.27	3.06 (0.28)
420 (10)	3.01	0.06	0.27	3.01 (0.28)
530 (10)	3.28	0.07	0.28	3.31 (0.30)
548 (10)	3.32	0.07	0.28	3.35 (0.30)
660 (10)	2.89	0.06	0.26	2.95 (0.26)
791 (15)	2.67	0.05	0.25	2.84 (0.24)

На рис. 14. приведена температурная зависимость, полученная для $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$ (квадраты). Здесь же ромбами представлены данные PSI. Сплошная линия на графике – теоретические расчёты. Из рисунка видно, что при температурах ~300К наши данные хорошо совпадают с данными PSI.

Экспериментальные данные для МК в дейтерии при температурах выше 400 К получены впервые. Они носят предварительный характер. Планируется провести более тщательный анализ полученных величин $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$ и $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$, а также провести дополнительные измерения в этом диапазоне температур, улучшив при этом точность измерений как по эффективности регистрации нейтронов, так и по определению плотности смеси.



кривая - М.Р. Faifman, Нур. Int. 101/102 (1996) 179.

□ - S.E. Jones et al., Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 588.

Рис. 14. Зависимость $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$ от температуры: ■ – работа [164], □ - работа [171].

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации.

1. Разработан и создан радиационно-безопасный комплекс подготовки газовой смеси для обеспечения экспериментов по МК, позволяющий проводить работы с тритием в количествах до 10 кКи в условиях открытых лабораторий, обеспечивающий подготовку смеси заданного изотопного состава, анализ молекулярного и изотопного состава смеси, очистку смеси до уровня не хуже 10^{-7} об. долей по примесям с $Z > 4$, подачу её в мишень и утилизацию после завершения работ. Он позволил провести систематические исследования процессов МК в двойных D/T и тройных H/D/T смесях ИВ. Начиная с 1997г., с использованием КПГС проведен цикл работ, в ходе которого было использовано порядка 500 кКи трития. КПГС работал надёжно, превышения фона по объёмному содержанию трития в рабочей зоне и вытяжной вентиляции зафиксировано не было.

Разработана серия мишеней высокого давления (ДМВД, ТМВД, ТМСД), позволивших провести исследования процессов МК в диапазоне температур 20-800К и давлений до 200 МПа. Новизна технических решений, заложенных в конструкцию мишеней, защищена Патентами РФ.

2. Получены новые экспериментальные значения длительной (80 часов) прочности сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений при воздействии водорода высокого давления (до 150МПа) в диапазоне температур 20-600⁰С. Результаты испытаний

показывают, что длительная выдержка в среде водорода при 20°C оказывает небольшое влияние на прочностные характеристики сплава ХН40МДТЮ-ИД. С повышением температуры испытаний временное сопротивление под воздействием водорода уменьшается на ~ 19% (при 600°C), а величина условного предела текучести в этих же условиях испытаний оказывается практически нечувствительной к водородному воздействию. Температурная зависимость характеристик пластичности сплава ХН40МДТЮ-ИД в среде водорода имеет минимум при температуре 300°C, при этом во всем исследованном диапазоне температур величины относительного удлинения δ и относительного сужения ψ более чувствительны к воздействию водорода, чем σ_b и $\sigma_{0.2}$.

Впервые получены параметры ВП как сплава ХН40МДТЮ-ИД и его сварных соединений, так и сплава с защитным покрытием из нитрида титана в диапазоне температур до 700°C. Найдено, что при температуре 400-500°C для покрытия из нитрида титана существует излом кривой проницаемости, связанный, по-видимому, с изменением механизма транспорта водорода через это покрытие. Применение защитного покрытия из нитрида титана позволяет снизить проницаемость водорода через сплав ХН40МДТЮ - ИД в ~ 3 - 10 раз в зависимости от температуры.

3. Для проведения исследований влияния трития на свойства конструкционных материалов, работающих в условиях воздействия высокого давления трития, разработано и создано оборудование, позволяющее (используя метод "третиего" трюка) проводить ускоренное накопления радиогенного гелия в матрице конструкционных материалов. При температуре выдержки исследуемых образцов в среде трития ~550°C и давлении ~50МПа коэффициент ускорения составляет величину от 10 до 100 раз. Проведены постановочные эксперименты, показывающие надежность работы оборудования при этих параметрах в течение 1400 часов.

Разработанная методика детритизации образцов методом изотопного разбавления, позволяет удалить тритий из образцов до уровня, достаточного для проведения работ с этими образцами в условиях неспециализированных лабораторий.

Создано оборудование и методика анализа объемного содержания радиогенного гелия и остаточного трития в матрице КМ.

4. Проведены измерения равновесных давлений десорбции протия и дейтерия над дигидридом и дидейтеридом ванадия в температурной области 273÷619К и области давлений 0,013÷486МПа. Найдено, что уравнения температурных зависимостей летучестей, соответствующих измеренным значениям давления, для протия и дейтерия имеют вид, соответственно:

$$H_2: \lg f(\text{МПа}) = -2187/T + 6,75 \text{ и}$$

$$D_2: \lg f(\text{МПа}) = -2577/T + 7,47$$

Область измеренных равновесных давлений десорбции по сравнению с литературными данными расширена на ~ 2 порядка для протия и на ~ 1,5 порядка для дейтерия.

Используя полученные результаты, создано семейство источников ИВ высокого давления.

5. На созданном оборудовании, начиная с 1997г., успешно проводятся систематические исследования МК. За это время получены следующие результаты:

- получены новые значения параметров цикла МК в двойной D/T смеси в диапазоне температур 20-800К и плотностей до 1.3 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси;
- впервые проведены систематические измерения параметров цикла МК в тройной H/D/T - смеси ИВ в диапазоне температур 20-800К и плотностей до 0.9 от плотности жидкого водорода и широком диапазоне изменений концентрации ИВ в смеси. Сделан вывод, что количество актов синтеза, инициированных одним мюоном, уменьшается при добавке в D/T смесь протия. Высокая скорость образования $d\mu$ - молекул из HD - молекул в H/D/T-смеси, предсказанная теоретиками и подтвержденная прямыми экспериментами, не может компенсировать потерь мюона за счет высокой вероятности его прилипания к гелию;
- получены новые экспериментальные значения величины $\lambda_{dd\mu}$ в диапазоне температур 400-800К при высоких плотностях дейтерия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Юхимчук, В.А. Анасов, Ю.И. Виноградов и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. Приборы и техника эксперимента, 1999, №6, с.17-23; Facility for preparation of gas mixture in muon catalyzed fusion experiments. Hyperfine Interactions 119(1999)341-344.
2. А.А. Yukhimchuk, V.N. Lobanov. Tritium handling. Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 661-668.

3. *A.A. Yukhimchuk and V.N. Lobanov.* The approach to the design of high-pressure tritium facilities. *J. Moscow Phys. Soc.*, V9, N4 (1999) 269-280.
4. *A.A. Yukhimchuk.* Technological aspects in the experiments on the muon catalyzed fusion and μ CF based INS. Proceedings of workshop on μ -catalyzed fusion: intense neutron source and its applications. ENEA B 301 N 00010 (1996) 57-69.
5. *А.А. Юхимчук, В.Н. Лобанов, А.И. Веденеев.* Тритиевые технологии в фундаментальной науке. Сборник докладов Международной конференции "Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях PRITТ99", Саров 17-21 мая 1999г, 44-51; В сб. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, вып.2 (2001) 6-15.
6. *R.I.II'kaev, V.N.Lobanov, A.A.Yukhimchuk.* Tritium technologies developed by RFNC-VNIEF for basic science. *Fusion Science and Technology*, Vol.41, No.3, Part 2 (2002)368-372; Тритиевые технологии, развиваемые в РФЯЦ-ВНИИЭФ для задач фундаментальной науки. - Вопросы атомной науки техники, 1/2 (2002) 191-196.
7. *A.A.Yukhimchuk.* Tritium activities in Russia. *Fusion Science and Technology*, Vol.41, No.3, Part 2 (2002)334-338.
8. *A.N. Golubkov and A.A. Yuhimchuk.* Sources of high-pressure isotope gases. *J. Moscow Phys. Soc.*, V9, №3 (1999) 223-230.
9. *В.Г. Клевцов, В.Н. Лобанов, Ю.А. Хабаров, А.А. Юхимчук.* Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами. *Материаловедение*, 5 (2002) 53-56.
10. *Ю.И. Виноградов, В.С. Арюткин, В.А. Курякин, В.В. Травкин, А.А. Юхимчук.* Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза. Препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ, 82-2002. Саров, 2002, 26с.
11. *В.В. Перевозчиков, А.А. Юхимчук, Н.С. Ганчук и др.* Тритиевая мишень высокого давления. ПТЭ, 1 (1999) 28-33; *Hyperfine Interactions* 118(1999)353-355.
12. *В.В. Перевозчиков, А.А. Юхимчук, Н.С. Ганчук и др.* Тритиевые мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа. Сборник докладов Международной конференции "Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях PRITТ99", Саров 17-21 мая 1999г., 114-120. В сб. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, вып.2 (2001) 16-23.
13. *V.V. Perevozchikov, A.A. Yuhimchuk, Yu.I. Vinogradov et al.* Deuterium high pressure target. Preprint of the JNR, D13-2001-118, Dubna, 2001; *ВАНТ* 1/2 (2002) 177-182.

14. *А.А. Юхимчук, В.И. Тихонов, С.К. Гришечкин и др.* Сосуд для хранения изотопов водорода. Патент РФ №2136064, Бюл. "Изобретения", 24 (1999) 27.08.99.
15. *А.А. Юхимчук, Д.Л. Демин, В.Г. Зинов и др.* Способ получения изотопов водорода высокой плотности. Патент РФ №2163837 С2. Бюл. "Изобретения", 7 (2001) 10.03.2001.
16. *А.А. Юхимчук, В.И. Тихонов, Д.Л. Демин и др.* Способ получения высокой плотности изотопов водорода. Патент РФ №2174043, Бюл. "Изобретения", 27 (2001) 27.09.01.
17. *С.К. Гришечкин, И.Е. Бойцов, ..., А.А. Юхимчук.* Разработка сосудов высокого давления изотопов водорода. Международный семинар "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами", Саров, 2-6 апреля 2001. Тезисы докладов, с.115.
18. *A.V. Bazunov, I.E. Boitsov, S.K. Grishechkin, ... and A.A. Yuhimchuk.* Physical and mechanical properties of structural materials. *J. Moscow Phys. Soc.* 9(1999)237-244.
19. *I.E. Boitsov, S.K. Grishechkin, I.L. Malkov, ..., A.A. Yuhimchuk.* *International J. of Hydrogen Energy* 24 (1999) 919-926.
20. *А.А. Юхимчук, Р.И.Илькаев, В.Н.Лобанов.* Изотопы водорода в научных программах РФЯЦ-ВНИИЭФ. *Материаловедение*, 2 (2002) 35-42.
21. *А.А. Yuhimchuk, V.K. Gaevoy.* Study of hydrogen isotope permeation through some construction materials. *J. of Nuclear Materials* 233-237(1996) 1193-1197; *А.А.Юхимчук, В.К. Гаевой, С.К. Гришечкин.* Исследование проницаемости изотопов водорода через некоторые конструкционные материалы. В сб. Твердые фазы, содержащие изотопы водорода. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999, 81-89.
22. *И.Л.Малков, С.В.Златоустовский, В.Г.Клевцов, ..., А.А.Юхимчук.* Метод создания повышенной концентрации трития в конструкционных материалах. Сборник докладов Международного семинара "Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях PRITТ99", Саров 17-21 мая 1999г., 39-42.
23. *И.Л.Малков, В.Г. Клевцов, А.А.Юхимчук.* Применение метода "тритиевого трюка" для ускоренного накопления гелия-3 в конструкционных материалах. *Материаловедение*, 5 (2002) 34-37; Creation of ^3He high concentration in structural materials. The 9 International Advanced Research Workshop. Hydrogen isotope recycling at plasma-facing materials in fusion reactors, September 20-22, 2000. Argonne National Laboratory, USA.
24. *А.А. Юхимчук, А.Н. Голубков, Б.Н. Теняев и др.* Стенд для исследования сорбционных свойств поглотителей водорода. Патент РФ 9650 U1, Бюл. "Изобретения", 4 (1999) 16.04.99.

25. *N.S. Ganchuk, S.K. Grishchkin, A.A. Kononenko, ..., A.A. Yukhimchuk.* A radiation-safe container for D-T filling of laser targets. *Journal of the Moscow Physical Society*, V9, N4, (1999)289-294.
26. *A.H. Голубков, С.К. Гришечкин, А.А. Юхимчук, В.Н. Лобанов.* Источники изотопов водорода высокого давления на основе гидрида ванадия. Сборник докладов Международной конференции "Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях PRIT99", Саров, 17-21 мая 1999г, 120-123.
27. *A.N. Golubkov, A.A. Yukhimchuk.* Equilibrium pressures of protium and deuterium over vanadium dihydride phase. VI International conference "Hydrogen materials science & chemistry of metal hydrides" Katsiveli, Crimea, September 2-8, 1999// *Proceedings*, p.146.
28. *A.N. Golubkov, A.A. Yukhimchuk.* High-pressure hydrogen isotope sources based on vanadium hydride. International RIKEN Conference. Muon catalyzed fusion and related exotic atoms. April 22-26, 2001. Shimoda, Japan. p. 5-7; VII International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides", September 16-22, 2001, Alushta, Crimea, Ukraine // *Proceedings*, p.298-301.
29. *A.N. Golubkov, S.K. Grishchkin, A.A. Yukhimchuk.* System for investigation of hydrogen isotopes – solid body interaction at 500MPa. *International J. of Hydrogen Energy* 26(2001)465-468.
30. *Yu.V. Andramanova, A.V. Veselov, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* *Inertial Fusion Sciences and Applications* 99. Editors C.Labaune, W.J.Hogan, K.A.Tanaka. 1999, 891-896.
31. *Н.Н. Графов, В.Г. Гребинник, Д.Л. Демин и др.* Жидкотритиевая мишень. ПТЭ 1(1999)21; *D.L. Demin, V.P. Dzheleпов, N.N. Grafov et al.* *Hyperfine Interaction* 119(1999)349.
32. *Yu.P. Averin, D.V. Balin, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* Novel method for the MCF study in dense D/T mixture. First experimental results. *Hyperfine Interactions* 118(1999)111-119.
33. *Yu.P. Averin, D.V. Balin, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* First measurements of dt μ cycle characteristics in liquid H/D/T mixture. *Hyperfine Interactions* 118(1999)121-125.
34. *V.R. Bom, L.N. Bradbury, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* Temperature and density dependence of μ -catalysis cycling rate in dense D/T and H/D/T gas mixtures. *Hyperfine Interactions* 118(1999)103-109.
35. *D.L. Demin, V.V. Filchenkov, ..., A.A. Yukhimchuk 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. Сообщение ОИЯИ, г.Дубна. E15-2000-156.
36. *D.L. Demin, V.V. Filchenkov, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* The investigation of the parameters of muon catalyzed fusion in double D/T mixture at high temperature and density. Сообщение ОИЯИ, г.Дубна. E15-2000-157.
37. *V.R. Bom, J.N. Bradbury, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* Investigation of the parameters of muon catalyzed fusion in double D/T mixture at high temperature and density. Abstract of the International RIKEN Conference. Muon catalyzed fusion and related exotic atoms. April 22-26, 2001. Shimoda, Japan. p. 3-3.
38. *Yu.P. Averin, V.R. Bom, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* Experimental results on the muon catalyzed dt fusion in H/D/T mixture. Abstract of the International RIKEN Conference. Muon catalyzed fusion and related exotic atoms. April 22-26, 2001. Shimoda, Japan. p. 3-8.
39. *V.R. Bom, D.L. Demin, ..., A.A. Yukhimchuk et al.* Measurement of the temperature dependence of the dd μ -molecule formation rate in dense deuterium at temperatures 80-800K. International RIKEN Conference. Muon catalyzed fusion and related exotic atoms. April 22-26, 2001. Shimoda, Japan. p. 4-4.

Получено 25 июля 2002 г.