

Д13-2001-118

В.В.Перевозчиков*, А.А.Юхимчук*, Ю.И.Виноградов*,
М.Д.Вихарев*, Н.С.Ганчук*, А.Н.Голубков*,
С.К.Гришечкин*, А.М.Демин*, Д.Л.Демин, В.Г.Зинов,
А.А.Кононенко*, В.Н.Лобанов*, И.Л.Малков*,
С.А.Юхимчук

ДЕЙТЕРИЕВАЯ МИШЕНЬ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»
и в труды международной конференции «Мюонный катализ
и экзотические атомы», Шимода, Япония, 23–27 апреля 2001 г.

*Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Россия

Введение

При проведении систематических исследований параметры мюонного катализа ядерных реакций синтеза в дейтерии высокой плотности при температурах 400-800 К остались неизученными. Данные о скорости образования молекул $dd\mu$ необходимы и при анализе результатов экспериментов в двойной D/T [1,2] и тройной H/D/T [1,3] смеси, где извлечение скоростей элементарных процессов $\lambda_{d\mu}$ производится с учетом расчетной величины скорости образования мезомолекулы $\lambda_{dd\mu}$ в дейтерии. Экспериментальные данные о величине $\lambda_{dd\mu}$ имеются только для диапазона температур до 400 К [4-6].

Для прямых измерений $\lambda_{dd\mu}$ в диапазоне температур 80-800 К была создана дейтериевая мишень высокого давления (ДМВД), которая удовлетворяет следующим техническим требованиям:

- объем мишени – 76 см³;
 - рабочее давление – до 150 МПа;
 - диапазон эксплуатационных температур – от 80 до 800 К;
 - компримирование рабочей смеси – прямое или криогенное;
 - водородная прочность;
 - ресурс работы – не менее 400 ч при предельных условиях эксплуатации;
 - прочностная надежность – $R \geq 0,99999$ при уровне доверительной вероятности 0,95.
- ДМВД существенно превосходит мишень, описанную в [7], по предельной эксплуатационной температуре без снижения величины предельного рабочего давления.

Конструкция ДМВД

ДМВД (рис. 1) представляет собой комплекс устройств, который обеспечивает:

- генерирование диффузионно-чистого дейтерия из термодесорбционных металлургических источников BS1, BS2 на основе ванадия и урана соответственно [8,9];
- охлаждение, нагрев и поддержание заданной температуры ампулы мишени в диапазоне 80 – 800 К;
- заполнение ампулы дейтерием при температуре 80 – 300 К.

В отличие от ранее разработанных конструкций тритиевых мишеней высокого давления (ТМВД) [10,11], ампула и охладитель ДМВД конструктивно объединены в один узел – мишенный блок (рис. 2). Это позволило сократить габариты мишени по вертикали. При применении в качестве хладагента жидкого гелия возможна эксплуатация мишени при температурах от 20 до 800 К.

Конструкция ампулы ДМВД аналогична устройству этого элемента в ТМВД [10], различие заключается лишь в габаритах и оформлении нижней части. Цилиндрическая газовая полость ампулы ДМВД имеет диаметр 31 мм и высоту 100 мм. В качестве материала основных силовых элементов ампулы используется, как и в ТМВД, водородостойкий сплав ХН40МДТЮ–ИД. Несущая способность ампулы, по результатам ее прочностных исследований, составляет 260 МПа, что подтверждает ее требуемую прочностную надежность ($R \geq 0,99999$ при уровне доверительной вероятности 0,95).

Охладитель (см. рис.2) представляет собой проточный криостат, состоящий из корпуса 2 и вкладыша 3. Эти элементы изготовлены из меди и герметично соединены между собой сваркой. В верхней и нижней части боковой поверхности А вкладыша выполнены кольцевые прямоугольные пазы Б и В, соединяющиеся между собой через винтовые канавки Г. Во вкладыше имеется специальная полость Д, которая заполняется газом (азот, метан или углекислота) и служит конденсационным термометром. К кор-

пусу вкладыша 3 приварены штуцеры 4 и 5, обеспечивающие соединение охладителя с внешними магистралями подачи и эвакуации хладагента.

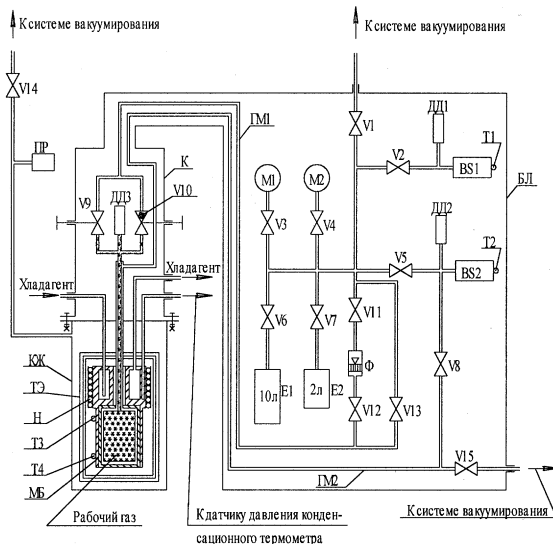


Рис. 1. Принципиальная схема ДМВД: МБ – мишенный блок; КЖ – вакуумный кожух; К – колпак; Н – нагреватель; Т1...Т4 – термопары; ДД1 (250 МПа), ДД2 (60 МПа), ДД3 (250 МПа), – датчики давления, V1...V14 – вентили; V15 – вентиль вакуумный; ПР – измеритель вакуума (PKR 261); M1 (1 МПа), M2 (25 МПа) – манометры;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

Для более равномерного распределения температуры по корпусу ампулы и эффективной теплопередачи нижняя часть корпуса охладителя выполнена в виде цилиндрической обечайки с толщиной стенки 1,5 мм, которая установлена на поверхность ампулы Е с гарантированным натягом и зафиксирована на ней равномерно распределенными сварными швами.

На рис. 1 показаны основные элементы ДМВД, обеспечивающие ее безопасную эксплуатацию при высоких давлениях и температурах рабочего газа. Мишенный блок МБ расположен в вакуумном кожухе КЖ, внутренняя полость которого вакуумируется внешней системой. На корпусе этого кожуха в зоне прохождения мюонного пучка для минимизации количества металла на пути вылета электронов распада выполнено утонение. Вакуум во внутренней полости кожуха контролируется измерителем ПР.

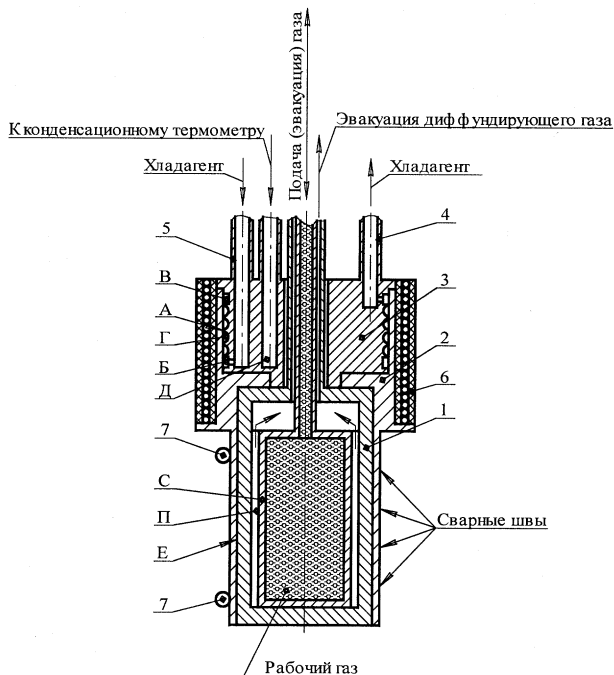


Рис. 2. Схематическое изображение мишенного блока: 1 – ампула; 2 – корпус; 3 – вкладыш; 4,5 – штуцеры; 6 – нагреватель; 7 - термометры

Для защиты обслуживающего персонала в случае разрушения арматуры высокого давления на верхнюю часть кожуха установлен колпак К. Под колпаком расположены вентили высокого давления V9 и V10 с ручным управлением, тензометрический датчик давления ДДЗ и газовая магистраль высокого давления ГМ1 для подачи и эвакуации рабочего газа. Вентили V9 и V10 предназначены для отсечения внутреннего объема ампулы после заполнения ее рабочим газом. Управление этими вентилями выведено за наружную поверхность колпака К.

Нагрев ампулы до требуемого уровня температуры обеспечивается нагревателем Н, расположенным на корпусе мишенного блока МБ, заключенного в набор шестислойных радиационных теплоотражающих экранов ТЭ. Применение экранов снижает требуемую мощность нагревателя в стационарных условиях, обеспечивает достаточно равномерное распределение температуры по корпусу ампулы и препятствует нагреву внешней поверхности кожуха КЖ до температуры, превышающей 70 °С.

Система газового обеспечения

Система газового обеспечения предназначена для подачи дейтерия в ампулу мишенного блока при давлениях до 150 МПа и его эвакуации после проведения экспериментов. Кроме того, она позволяет проводить измерения количества рабочего газа, находившегося в ампуле. Система состоит (см. рис. 1) из источников BS1 и BS2, диффузионного фильтра Ф, манометров М1, М2, мерных емкостей Е1 и Е2, датчиков давления ДД1 и ДД2, термодпар Т1 и Т2, газовых магистралей и вентилях. Она выполнена в виде отдельного блока БЛ, представляющего собой ферму, на которой установлены все указанные элементы. Внешние поверхности фермы облицованы защитными панелями. Газовые магистрали ГМ1 и ГМ2 на участке между этим блоком БЛ и колпаком К заключены в защитную трубу.

В ДМВД использованы источники дейтерия на основе гидридов урана и ванадия. Источники имеют сходную конструкцию и отличаются только применяемым рабочим веществом – носителем газа. Схематично источник изображен на рис. 3.

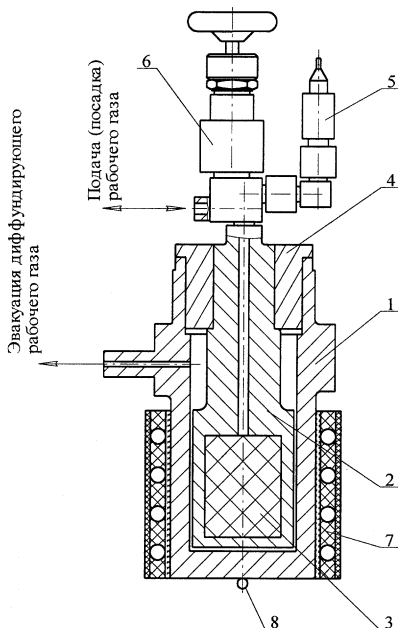


Рис.3. Схематическое изображение источника: 1 – корпус наружный; 2 – корпус внутренний; 3 – металлгидрид (носитель рабочего газа); 4 – герметизирующая крышка; 5 – датчик давления; 6 – вентиль высокого давления; 7 – нагреватель; 8 - термодпара

Источник на основе урана позволяет выделить при нагреве более 99 % содержащегося в нем газа, а при охлаждении до комнатной температуры остаточное давление в ампуле мишени составляет $\approx 3,5 \cdot 10^{-4}$ Па (равновесное давление паров над гидридом урана) [12,13]. Поэтому с помощью источника на основе урана можно осуществлять

практически полную эвакуацию газа из магистралей и из ампулы мишени после проведения опыта. Этот же источник может быть использован для поглощения дейтерия, диффундирующего сквозь стенки мишенного блока в процессе нагрева мишени.

Таким образом, может быть осуществлен полностью замкнутый по газу цикл проведения опытов. Однако источник на основе урана не может создать требующиеся для заполнения ампулы давления. Зависимость давления, создаваемого дейтеридом урана, от температуры его нагрева представлена на рис. 4 (прямая 1).

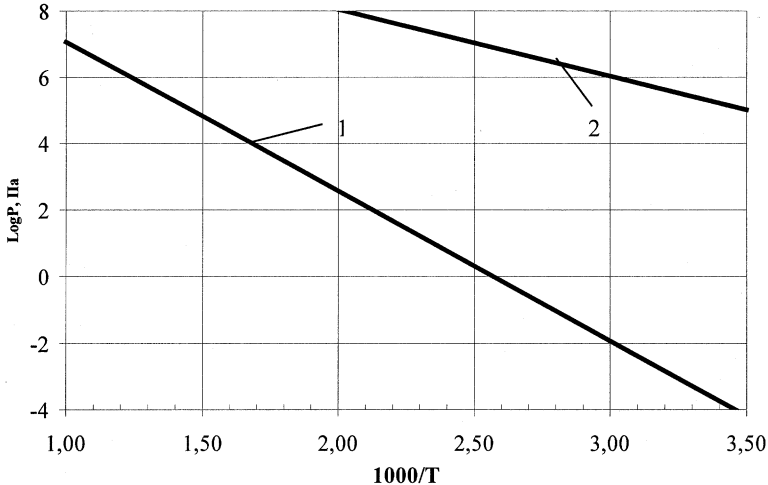


Рис.4. Зависимость давления, создаваемого дейтеридами урана и ванадия, от температуры

Из-за значительного снижения при высоких температурах прочностных характеристик конструкционных сталей, использованных при изготовлении источника BS2, область его нагрева ограничена величиной ≈ 970 К. Как видно из рис.4, при такой температуре он может создать давление не более $\approx 7,5$ МПа. Дальнейшее повышение давления в ампуле возможно за счет ее нагрева, при условии что она заполнялась охлажденной до криогенных температур, или путем использования другого источника - на основе ванадия (BS1).

Гидрид ванадия считается одним из наиболее удобных носителей водорода для создания источников высокого давления [14,15]. Он имеет самое большое из всех гидридов металлов значение объемного удельного содержания водорода - $8,5 \cdot 10^{-2}$ моль/см³, а также высокие значения равновесного давления изотопов водорода над гидридом при сравнительно низких температурах. Зависимость равновесного давления дейтерия над дейтеридом ванадия от температуры показана на рис. 4 (прямая 2) [16]. Из рис.4 видно, что источник дейтерия на основе ванадия может создать давление 150 МПа уже при температуре ≈ 520 К. Поэтому с помощью этого источника легко создать любое рабочее давление в ампуле независимо от ее температуры. К недостаткам дейтерида ванадия следует отнести сравнительно высокое значение равновесного давления дейтерия

над ним при комнатной температуре ($\approx 6,6 \cdot 10^4$ Па). Поэтому с помощью этого источника произвести достаточно полную эвакуацию оставшегося в магистралях после заполнения мишени газа затруднительно, это удобнее сделать с помощью источника на основе урана.

Система охлаждения

Конструкция охладителя мишенного блока (см. рис. 2) позволяет использовать жидкий азот или гелий. В зависимости от применяемого вида хладагента (азот или гелий) мишень охлаждается до 80 или до 20 К. Подача и эвакуация хладагента обеспечивается специальной системой термостатирования [17]. Температура мишени регулируется расходом хладагента с точностью ± 3 К. Ввод хладагента в охладитель осуществляется через магистраль, соединяющуюся с штуцером 5, имеющим выход в объем нижнего кольцевого паза Б вкладыша 3. Из указанной полости хладагент по винтовым канавкам Г попадает в объем верхнего кольцевого паза В с последующей эвакуацией хладагента через магистраль, соединенную с штуцером 4. Геометрия корпусных деталей и газовых каналов охладителя выбраны с учетом обеспечения требуемых теплофизических характеристик.

Система нагрева

Нагреватель (см. рис. 2) по своему устройству аналогичен применяемому в ТМВД [10]. Он обеспечивает нагрев и поддержание температуры ампулы мишени от 300 до 800 К с точностью ± 1 К. Для обеспечения надежности при эксплуатации нагреватель состоит из двух отдельных нагревательных элементов мощностью 250 Вт каждый. Мощности одного элемента достаточно для поддержания температуры корпуса ампулы во всем диапазоне эксплуатационных температур. Управление электрическими параметрами нагревателя осуществляется автоматизированной системой контроля и управления (СКУ) ДМВД.

Система контроля и управления

СКУ ДМВД выполнена с учетом требований надежности и безопасности ее функционирования. Она представляет собой распределенную сеть, состоящую из центрального компьютера и набора автономных сетевых модулей. Для сбора данных с датчиков и управления блоками регулирования используются следующие интеллектуальные устройства: модули удаленного аналогового и дискретного ввода/вывода серии I-7000 (ICP DAS) с интерфейсом RS-485; 2-канальный контроллер TPG-256 («Balzers Instruments») с интерфейсом RS-232.

СКУ включает:

- термодпары для измерения температуры источников и рабочего газа во внутренней полости ампулы мишени;
- тензометрические датчики давления;
- измеритель вакуума;
- электронные регуляторы мощности для нагревателей источников и фильтра;
- электронные регуляторы мощности для нагревателей мишени.

СКУ обеспечивает:

- измерение и регулирование давления и температуры рабочего газа во внутренней полости ампулы мишенного блока;
- регулирование и мониторинг температур и давлений рабочего газа в термодесорбционных металлгидридных источниках;
- регулирование и мониторинг температуры диффузионного фильтра;
- измерение вакуума во внутренней полости кожуха;
- отображение всех измеряемых параметров в реальном времени;
- сохранение всех измеряемых параметров для последующей обработки и анализа.

Давление рабочего газа во внутренней полости ампулы мишенного блока и в термодесорбционных металлгидридных источниках регистрируется датчиками давления тензометрического типа с верхним пределом измерения 250 МПа (погрешность калибровки 3 %).

Вакуум во внутренней полости кожуха К (см. рис. 1) контролируется измерителем PKR 261 («Balzers Instruments»), имеющим диапазон измерений $5 \cdot 10^{-4} - 10^3$ мбар.

Температура рабочего газа во внутренней полости ампулы мишенного блока контролируется термопарами Т3 и Т4, имеющими непосредственный контакт с корпусом указанного блока. При определении температуры рабочего газа во внутренней полости ампулы принято допущение, что при установившемся статическом режиме температура корпуса ампулы с хорошей точностью приближается к температуре этого газа. Термопары выполнены из термоэлектродной изолированной «термопарной» проволоки, имеющей градуировку «хромель/копель».

Определение температуры корпуса мишенного блока, а следовательно, и рабочего газа в области температур ниже комнатной производится методом конденсационной термометрии. Суть этого метода заключается в регистрации изменения давления газа, размещенного в полости Д (см. рис. 2) охладителя, с изменением температуры. В качестве конденсируемого газа используется азот, метан или уголекислота в зависимости от температуры мишенного блока, при этом в указанной полости давление может достигать 6 МПа. Регистрация параметров состояния газа обеспечивается автономной системой, не входящей в состав ДМВД. При температуре ампулы мишени выше комнатной газ из полости Д откачивается форвакуумным насосом.

Регистрация температуры рабочего газа в источниках BS1 и BS2 осуществляется термопарами Т1 и Т2. По своей конструкции они аналогичны термопарам, применяемым при контроле температуры рабочего газа во внутренней полости ампулы мишенного блока. Регистрация температуры в случае применения термопар производится многоканальным модулем аналогового ввода I-7018 (ICP DAS), который позволяет измерять термо-э.д.с. термопары в диапазоне температур от минус 200 до 1300 °С с точностью 0,05 %. Предельная инструментальная погрешность измерений температуры составляет: при температуре минус 200 °С - $\pm 5,6$ °С, при температуре 0 °С - $\pm 4,0$ °С и при температуре 600 °С - $\pm 5,6$ °С.

СКУ непрерывно регистрирует давления и температуры в ампуле мишенного блока и в источниках. При превышении предельных значений этих параметров автоматически отключается питание нагревателей этих узлов.

Функционирование ДМВД

Перед началом экспериментов проводится вакуумирование всех газовых магистралей ДМВД (см. рис. 1) до остаточного давления не хуже 10^{-4} мбар (при необходимости с

температурным отжигом). По достижении этого давления производится охлаждение ампулы мишенного блока до требуемой температуры. Далее производится нагрев диффузионного фильтра Ф до рабочей температуры (450 – 500 °С) при постоянном его вакуумировании с двух сторон. После этого источник BS2 нагревается до температуры, обеспечивающей давление рабочего газа в источнике 6 МПа. Газ, генерируемый этим источником, через фильтр Ф поступает во внутреннюю полость ампулы мишени. После завершения процесса заполнения нагрев источника BS2 прекращается.

Параллельно с заполнением ампулы мишени дейтерием можно производить дозаполнение источника BS1. Заполнение ампулы мишени в диапазоне давлений от 6 до 60 МПа обеспечивается источником BS1. Также от этого источника можно заполнить ампулу мишени дейтерием до давления 150 МПа через «байпасную» линию, минуя фильтр Ф. При достижении в ампуле мишени необходимого давления ее заполнение прекращается (отключается нагрев источника BS1) и производится экспозиция мишени либо ее температура поднимается до заданной по условиям эксперимента величины.

Дейтерий, оставшийся в газовых магистралях после проведения операции заполнения, адсорбируется источником BS2. После полного поглощения газа указанным источником отключается нагрев фильтра Ф.

В процессе исследований мюонного катализа при высоких температурах и давлениях диффундирующий из внутренней полости ампулы через ее первую стенку С в полость П (см. рис. 2) дейтерий эвакуируется из мишенного блока по магистрали ГМ2 (см. рис. 1). Эвакуация диффундирующего дейтерия может производиться в двух режимах: первый предполагает эвакуацию дейтерия на урановый источник BS2; второй – откачку внешней системой вакуумирования.

После окончания экспериментов производится эвакуация газа из ампулы мишени. Эвакуация может проводиться двумя путями: непосредственно на источники BS1 и BS2 либо сначала на емкость E1(E2), а затем - на источник BS2. Эвакуация по второму варианту осуществляется при необходимости измерения количества газа, находившегося в ампуле мишени в процессе проведения эксперимента.

Результаты эксплуатации

Криогенные и функциональные испытания мишени, а также эксперименты на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ общей длительностью 250 ч показали, что ДМВД обладает следующими технологическими параметрами:

- охлаждение корпуса ампулы от комнатной температуры до 80 К занимает 2 ч;
- генерирование и сжижение максимального количества диффузионно-чистого дейтерия с плотностью 0,85 от плотности жидкого водорода происходит за 3 ч;
- нагрев мишени от 80 до 800К осуществляется за 3 ч;
- потери рабочего газа за счет диффузии при максимальной эксплуатационной температуре 800 К и давлении 150 МПа составляют не более 5 % за 10 ч.

Анализ спектра электронов (рис.5) от распада мюонов, остановившихся в мишени, показал, что конструкция мишени и примененные в ней конструкционные материалы позволяют с хорошей эффективностью проводить ядерно-физические измерения параметров мюонного катализа ядерных реакций синтеза.

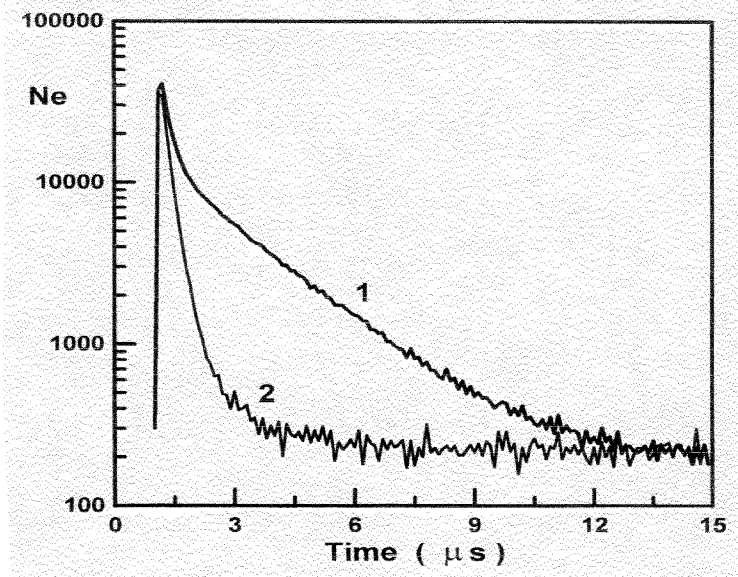


Рис. 5. Временной спектр электронов распада: 1 - мишень заполнена дейтерием, 2 - пустая мишень

Заключение

Конструкция ДМВД и ее технологические возможности позволили провести серию экспериментов (~150 ч) на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ, при этом впервые были определены параметры мюонного катализа ядерных реакций синтеза в диффузионно-чистой дейтерии при температурах от 400 до 800 К и давлениях до 150 МПа.

Авторы выражают благодарность всем специалистам и сотрудникам завода РФЯЦ – ВНИИЭФ, активно принимавшим участие в разработке и изготовлении ДМВД, а также всем сотрудникам РФЯЦ – ВНИИЭФ и ОИЯИ за помощь в проведении ее ресурсных, функциональных и криогенных испытаний. Авторы признательны В.М. Першиной за помощь в разработке конструкторской документации, также Н.Н. Графову, В.Г. Гребиннику, А.П. Кустову и М.М. Петровскому за сотрудничество при эксплуатации мишени. Особую благодарность авторы выражают члену-корреспонденту РАН Л.И. Пономареву за постоянное внимание и помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства атомной энергии РФ (договор № 6.25.19.19.00.969).

Литература

1. V.R. Bom, J.N. Bradbury, J.D. Davies et al. // *Hyperfine Interactions* 118 (1999) 103.
2. V.R. Bom, J.N. Bradbury, J.D. Davies et al. *JINR Communication* E15-2000-157, Dubna, 2000.
3. V.R. Bom, J.N. Bradbury, J.D. Davies et al. *JINR Communication* E15-2000-156, Dubna, 2000.
4. C. Petitjean, D.V. Balin, W.H. Breunlich et al. // *Hyperfine Interactions* 118 (1999) 127.
5. В.П. Джелепов, В.Г. Зинов, С.А. Ивановский и др. // *ЖЭТФ* 101, вып.4 (1992) 1105.
6. V.V. Filchenkov, L. Marcziš // *Muon Cat. Fusion* 5/6 (1990/1991) 499.
7. В.М. Быстрицкий, В.Б. Грановский, В.П. Джелепов и др. // *ПТЭ* 1 (1989) 50.
8. А.А. Юхимчук, В.А. Апасов, Ю.И. Виноградов и др. // *ПТЭ* 6 (1999) 17.
9. S.K. Grishechkin, A.A. Kononenko, V.V. Perevozchikov et al. A radiation - safe container for D - T filling of laser targets // *J. Moscow Phys. Soc.* 9 (1999) 289.
10. V.V. Perevozchikov, A.A. Yukhimchuk, D.L. Demin et al. // *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 42, No. 1 (1999) 25.
11. В.В. Перевозчиков, А.А. Юхимчук, Н.С. Ганчук и др. Тритиевые мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа // *Сборник докладов международного семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях»*. Саров, 2000. С. 114.
12. В.И. Михеева. Гидриды переходных металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
13. К. Маккей. Водородные соединения металлов. М.: Мир, 1968.
14. A.N. Golubkov, A.A. Yukhimchuk. Sources of gaseous high-pressure hydrogen isotopes // *J. Moscow Phys. Soc.* 9, No. 3 (1999) 223.
15. D.H.W. Carstens, W.R. David. Use of vanadium dihydride for production of high-pressure hydrogen gas // *Proc. of Int. Symposium on Metal Hydrogen Systems*, Miami, Florida, 1981, p.667.
16. A.N. Golubkov, S.K. Grishechkin, A.A. Yukhimchuk. System for investigation of hydrogen isotopes - solid body interaction at 500 MPa // *International Journal of Hydrogen Energy* 26 (2001) 465.
17. D.L. Demin, V.P. Dzheleпов, N.N. Grafov et al. // *Hyperfine Interactions* 101/102 (1996) 583; Н.Н. Графов, В.Г. Гребинник, Д.Л. Демин и др. *Препринт ОИЯИ Р13-95-179*, Дубна, 1995.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июня 2001 года.

Перевозчиков В.В. и др.
Дейтериевая мишень высокого давления

D13-2001-118

Приведена конструкция дейтериевой мишени высокого давления объемом 76 см^3 для исследования процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза в диффузионно-чистом дейтерии в диапазоне температур 80–800 К при давлениях до 150 МПа.

Изложены принципы работы основных систем мишени: генерации и очистки газа, охлаждения, нагрева, вакуумирования, управления и автоматизированного сбора данных.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Perevozchikov V.V. et al.
Deuterium High-Pressure Target

D13-2001-118

The design of the deuterium high-pressure target is presented. The target having volume of 76 cm^3 serves to provide the experimental research of muon catalyzed fusion reactions in ultra-pure deuterium in the temperature range 80–800 K under pressures of up to 150 MPa.

The operation of the main systems of the target is described: generation and purification of deuterium gas, refrigeration, heating, evacuation, automated control system and data collection system.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор А.Н.Шабашова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 22.10.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,95
Тираж 255. Заказ 52914. Цена 95 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области