



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-107

Д15-98-107

В.В.Перевозчиков\*, А.А.Юхимчук\*, Н.С.Ганчук\*,  
В.Г.Гребинник, С.К.Гришечкин\*, Д.Л.Демин, В.Г.Зинов,  
П.Д.Ишков\*, В.Н.Лобанов\*, И.Л.Малков\*,  
В.И.Тихонов\*, Ю.А.Хабаров\*

### ТРИТИЕВАЯ МИШЕНЬ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»  
и на конференцию International Workshop «EXAT-98»,  
July 19–24, 1998, Ascona, Switzerland

---

\*Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ  
экспериментальной физики, г.Саров Нижегородской области, Россия

1998

## Введение

В настоящее время исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза проводятся в дейтерий-тритиевых смесях в основном при низких температурах и при низких давлениях. Однако известно, что скорость мюонного катализа зависит от ряда макроскопических параметров, в том числе от температуры [1], плотности и относительной концентрации изотопов водорода ( $C_T$ ,  $C_d$ ,  $C_i$ ) в смеси [2].

Измерение параметров мюонного катализа в зависимости от температуры и высокой плотности сопряжено с проведением исследований при высоких давлениях, что, в свою очередь, влечет за собой создание соответствующих установок и мишеней. Наиболее высокими параметрами (давление и температура) обладали мишени, на которых проводились исследования в дейтерий-тритиевой смеси в LAMPF [3].

Для проведения исследований в двойной и тройной смеси изотопов водорода в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995-97 гг. создан комплекс оборудования, составной частью которого является тритиевая мишень высокого давления (ТМВД), обеспечивающая безопасное проведение работ при давлениях смеси до 120 МПа и температурах до 800 К. Требования к комплексу приведены в работе [4].

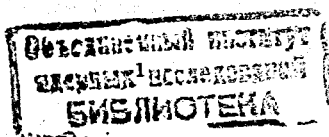
## Конструкция ТМВД

К конструкции ТМВД предъявляются следующие требования:

- рабочее давление до 120 МПа, рабочая температура 300-800 К;
- количество материала мишени на пути мюона и продуктов ядерных реакций должно быть минимально возможным;
- по условиям физического эксперимента при выборе материала мишени существует ограничение на количество примесей легких элементов ( $Z < 30$ );
- криогенная заправка рабочей смеси;
- водородная и тритиевая прочность;
- радиационная безопасность при активностях трития внутри мишени до 10 кКи;
- ресурс работы не менее 200 часов;
- прочностная надежность при уровне доверительной вероятности 0,95 должна составлять  $R \geq 0,999999$ .

ТМВД (рис. 1) представляет собой комплекс устройств, позволяющих сжимать требуемое по условиям эксперимента количество Н/Д/Т смеси в ампуле при 20 К с последующим ее нагревом до 800 К. Это позволяет получить давление до 120 МПа при минимальных количествах радиоактивного газа во вспомогательных коммуникациях и обезопасить процесс заполнения мишени. ТМВД функционально связана с комплексом подготовки газовой смеси (КПГС) [5], который обеспечивает:

- подачу в ампулу ТМВД рабочей смеси с уровнем примесей  $\leq 10^{-7}$  объемных долей и заданного молекулярного состава и последующую ее эвакуацию после проведения эксперимента;
- вакуумирование технологических объемов и полостей мишени;
- измерение и поддержание рабочих параметров мишени (давление, вакуум и температура).



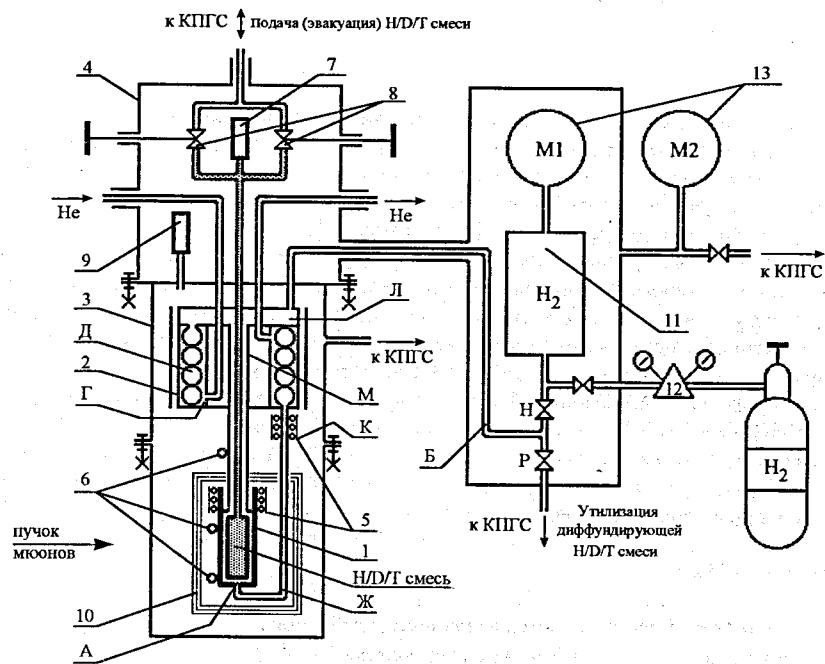


Рис. 1. Схематическое изображение ТМВД: 1 - ампула; 2 - охладитель; 3 - кожух; 4 - колпак; 5 - нагреватели; 6 - термопары; 7 - датчик давления; 8 - вентили высокого давления; 9 - преобразователь манометрический термопарный; 10 - экраны теплоотражающие; 11 - емкость водородная; 12 - редуктор водородный;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

ТМВД включает в свой состав ампулу 1, охладитель 2, кожух 3, колпак 4, два нагревателя 5, три термопары 6, датчик давления 7, два вентиля высокого давления 8, преобразователь манометрический термопарный 9 (ПМТ-4М), экраны теплоотражающие 10, емкость водородную 11, редуктор водородный 12 и мановакуумметры 13.

Основными силовыми элементами ампулы (рис. 2) являются вкладыш 1 и корпус 3, выполненные из водородостойкого сплава ХН40МДТЮ-ИД.

Для повышения удельных прочностных характеристик ампула выполнена по принципу автоскрепленного сосуда [6], для чего вкладыш с внутренним объемом  $16,5 \text{ см}^3$  установлен в корпус с гарантированным натягом. Несущая способность ампулы, по результатам испытаний ее макетов в исходном состоянии, составляет  $P=477 \text{ МПа}$ , что подтверждает ее прочностную надежность  $R \geq 0,999999$  при уровне доверительной вероятности 0,95. На поверхности А вкладыша выполнен ряд продольных пазов и цилиндрических канавок. Наружные поверхности вкладыша А и Б покрыты нитридом титана толщиной ~ 5 мкм. Это покрытие нанесено с целью создания водо-

родного барьера по площади контакта наружной поверхности вкладыша и внутренней поверхности корпуса [7]. Эффективность и работоспособность этого покрытия подтверждена при исследованиях специально разработанных для этой цели макетов, имитирующих конструкцию ампулы.

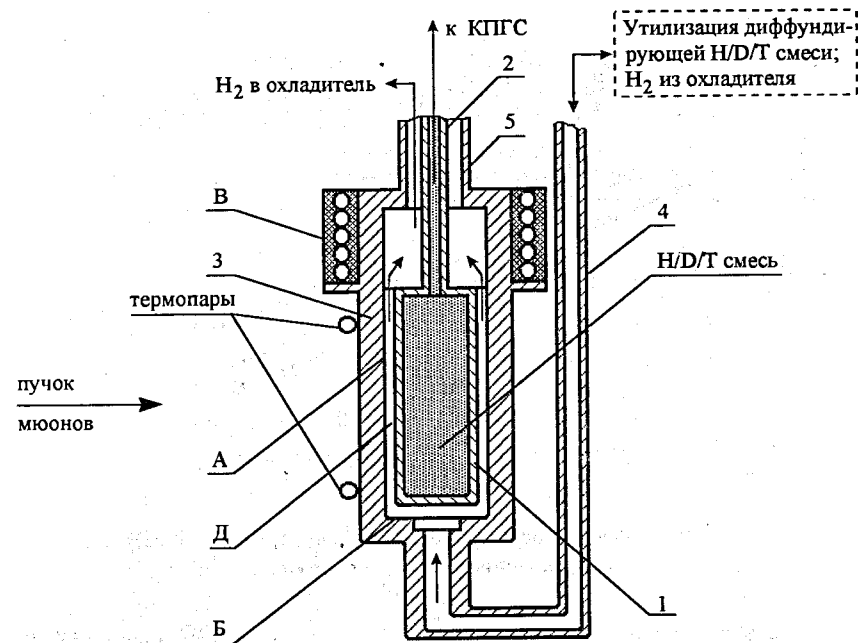


Рис. 2. Схематическое изображение ампулы ТМВД: 1 - вкладыш; 2,4,5 - трубки; 3 - корпус

На рис. 3 приведены результаты этих исследований. Видно, что нанесение покрытия из нитрида титана уменьшает проникновение изотопов водорода в 3 - 5 раз. Совокупность указанных каналов и покрытия создает вакуумируемый водородный барьер, предотвращающий диффузионное проникновение рабочей смеси за пределы ампулы и автоматически повышающий радиационную безопасность ТМВД при ее эксплуатации с тритийсодержащей смесью. В то же время каналы используются для охлаждения рабочей смеси. В этом случае через них проходит жидкий водород, который поступает из охладителя (рис. 4) по трубке 4 (рис. 2) и возвращается в охладитель по трубке 5, герметично закрепленной к корпусу 3. Эвакуация рабочей смеси из ампулы осуществляется по трубке 2.

На рис. 1 отражены основные конструктивные элементы мишени, обеспечивающие радиационно безопасную эксплуатацию ТМВД. Ампула и охладитель расположены в кожухе 3 (рис. 1), внутренняя полость которого соединена с вакуумной системой КПГС. Кожух конструктивно состоит из верхней и нижней частей, соединенных между собой фланцевым соединением. В нижней части кожуха выполнена выборка с

целью минимизации количества металла в зоне мюонного пучка. Все элементы кожуха выполнены из стали 12X18H10T. Вакуум во внутренней полости кожуха контролируется преобразователем манометрическим термопарным 9 (рис. 1).

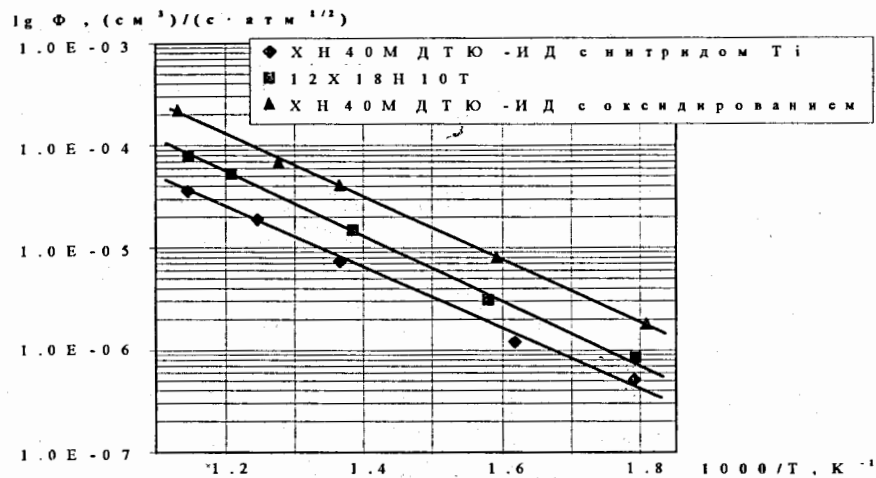


Рис. 3. Зависимость проницаемости водорода от температуры при различных покрытиях вкладыша макета

На кожух установлен колпак 4 (рис. 1), выполненный из стали 12X18H10T. Его внутренняя полость сообщается с боксом КППС. Во внутренней полости колпака расположены вентили высокого давления 8 ( $P_{\text{раб.}}=500 \text{ МПа}$ ) 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 КППС при ее эвакуации. Управление вентилями выведено на наружную поверхность колпака. Указанные вентили и датчик разработаны в РФЯЦ-ВНИИЭФ и безотказно эксплуатируются на протяжении длительного периода времени.

Нагрев ампулы обеспечивается нагревателем 5 (рис. 1), размещенным внутри шестислойных радиационных теплоотражающих экранов 10. Радиационные экраны позволяют получить достаточно равномерное распределение температуры ампулы и препятствуют нагреву кожуха выше 343 К.

В процессе охлаждения ампулы промежуточный хладагент (водород) контактирует с участками магистралей, загрязненными диффундирующим тритием. Поэтому для его размещения используется отдельная емкость 11. Конструктивно она состоит из накопительного резервуара, заключенного в защитный кожух; газовых магистралей и арматуры (вентилей). Накопительный резервуар по своим прочностным характеристикам позволяет реализовать рабочее давление водорода в его внутренней полости до 0,2 МПа избыточных. Накопительный резервуар, газовые магистрали и арматура заключены в защитный вакуумируемый герметичный кожух. Контроль давления во

внутренней полости накопительного резервуара и вакуума в защитном кожухе обеспечивается мановакуумметрами 13.

Охлаждение промежуточного хладагента осуществляется жидким гелием с помощью системы термостатирования, описанной в работе [8].

### Система охлаждения

Охладитель (рис. 4) предназначен для сжижения водорода, используемого при охлаждении рабочей смеси в ампуле до 20 К. Водород охлаждается жидким гелием. В состав охладителя входят корпус 1, трубки 2 и 3, штуцеры 4 и 5 и радиационный отражатель 6. Корпус состоит из двух не сообщающихся между собой полостей А и Б. В полости Б, предназначенной для циркуляции гелия, размещена медная трубка 2. Подача водорода в полость А осуществляется через штуцер 4, к которому подсоединяется магистраль

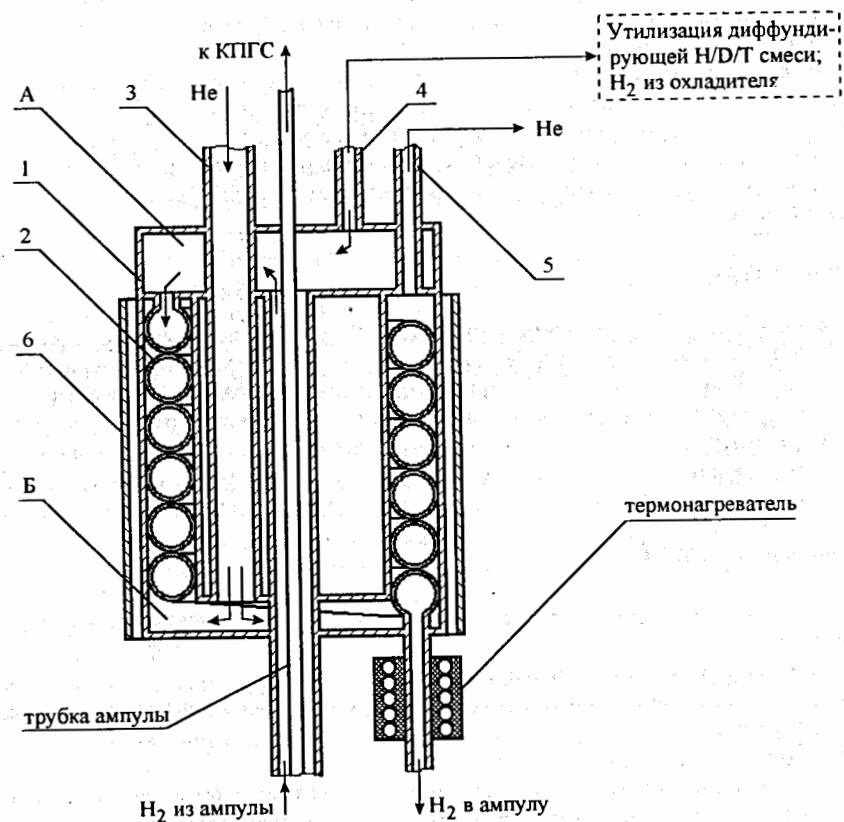


Рис. 4. Схематическое изображение охладителя ТМВД: 1 - корпус; 2,3 - трубки; 4,5 - штуцеры; 6 - отражатель

раль от водородной емкости. Подача гелия в полость Б осуществляется из сосуда Дьюара через трубку 3, а эвакуация - через штуцер 5. Для уменьшения энергетических потерь при проведении процесса охлаждения на корпус I установлен отражатель б. Все элементы охладителя, кроме трубки 2, изготовлены из стали 12Х18Н10Т и соединены между собой сваркой. Система охлаждения предназначена для перевода рабочей смеси из газообразной фазы в жидкую.

В качестве промежуточного теплоносителя используется водород (~80 см<sup>3</sup>), подаваемый в полости Л, Д и А по магистрали Б из водородной емкости 11 (см. рис. 1). Конструктивно эти полости объединены. Охлаждение водорода происходит в полости Д при прокачке через полость Г гелия из сосуда Дьюара. Водород в полости Д и гелий в полости Г движутся в противоположных направлениях. Из полости Г гелий удаляется в газгольдер. После охлаждения жидкий водород из полости Д стекает по трубке Ж и заполняет полость А ампулы, что обеспечивает переход рабочей смеси из газообразной в жидкую фазу. Из ампулы охлаждающий водород по трубке М направляется в полость Л охладителя и стекает в полость Д на повторное охлаждение, реализуя, таким образом, циркулирующий режим.

Высота трубки Ж и суммарное сечение пазов, образующих охлаждающую поверхность полости А ампулы, выбраны с учетом необходимого гидростатического давления и скорости протока водорода. Нагрев водорода в случае его кристаллизации в полости Д обеспечивается нагревателем К, встроенным в корпус трубки Ж. Степень охлаждения водорода в охладителе контролируется по давлению насыщенных паров мановакуумметром М1.

### Система нагрева

Нагреватель В (см. рис. 2) с максимальной мощностью 500 Вт позволяет нагревать ампулу до 800 К и обеспечивает поддержание требуемой температуры в течение всего эксперимента. Конструктивно нагреватель представляет из себя две коаксиально расположенные разрезные втулки из кварцевого стекла, в зазор между которыми установлена нагревательная спираль. Управление нагревателем осуществляется приборами КППС. Для уменьшения энергетических потерь при нагреве корпуса ампулы и уменьшения градиента температуры по его длине корпус установлен в радиационном экране.

### Вакуумирование ТМВД

Вакуумирование ТМВД (рис. 1) осуществляется вакуумным оборудованием, входящим в состав КППС.

Вакуумированию подвергаются:

- внутренняя полость ампулы и ее газоподводящие коммуникации перед заполнением их рабочей смесью;
- внутренняя полость кожуха;
- полости и газовые коммуникации охладителя, предназначенные и для утилизации диффундирующей тритийсодержащей рабочей смеси из ампулы при ее нагреве;
- внутренний объем защитного кожуха водородной емкости.

Перед началом работы производится вакуумирование внутренней полости кожуха до остаточного давления не более 1 Па. Контроль величины остаточного давления осуществляется преобразователем манометрическим термопарным, входящим в

состав ТМВД. Перед заполнением ампулы рабочей смесью осуществляется откачка газовой среды из ее внутренней полости и коммуникаций до величины не более  $10^{-2}$  Па. Откачка осуществляется при температуре ампулы 573...623 К, при этом коммуникации также прогреваются ленточными нагревателями.

После проведения процесса охлаждения рабочей смеси охлаждающий водород удаляется в водородную емкость. Завершение этой операции контролируют по показаниям мановакуумметра М1. Далее водородная магистраль Б с помощью вентилей Н и Р переводится в режим откачки для утилизации диффундирующей из внутренней полости ампулы при ее нагреве тритийсодержащей смеси. Кожух водородной емкости 11 вакуумируется до остаточного давления не более 1 Па. Контроль осуществляется по показаниям мановакуумметра М2.

### Измерительная система

Измерительная система ТМВД обеспечивает контроль:

- давления рабочей смеси;
- температуры рабочей смеси;
- вакуума внутренней полости кожуха.

Давление рабочей смеси в ампуле регистрируется датчиком давления тензометрического типа с верхним пределом измерения 150 МПа (погрешность 0,8%).

Вакуум во внутренней полости кожуха контролируется преобразователем манометрическим термопарным.

Температура контролируется тремя термопарами б (рис. 1). Две из них контактируют с корпусом ампулы и осуществляют контроль ее температуры. Третья, расположенная вне зоны действия радиационных теплоотражающих экранов, является контрольной и обеспечивает измерение температуры в зоне прохождения проводов измерительной и питающей систем. При определении температуры рабочей смеси в ампуле принято допущение, что при установившемся статическом режиме температура корпуса ампулы с большой степенью точности приближается к температуре этой смеси. Термопары изготовлены из термоэлектродной изолированной проволоки диаметром 2 мм градуировки "хромель-алюмель" в защитном чехле из нержавеющей стали. Масса спая незначительна, что обеспечивает малую постоянную времени термопары.

Регистрация температуры производится цифровым прибором ЦР-7701, который позволяет измерять сигнал э.д.с. термопары в диапазоне температур от минус 200°С до плюс 1300°С. Предельная инструментальная погрешность измерений составляет: при температуре минус 200°С - ±5,6°С, при температуре 0°С - ±4,0°С и при температуре плюс 600°С - ±5,6°С.

Приборы, регистрирующие давление и температуру, имеют ограничители предельных значений, при превышении которых автоматически отключается питание нагревателя. Протоколирование измерений ведется с помощью компьютера системы автоматизации КППС.

### Система радиационной безопасности

В соответствии с условиями проведения эксперимента суммарная активность трития в ампуле может достигать 10 кКи. С учетом этого в конструкцию ТМВД были заложены технические решения, обеспечивающие ее радиационно безопасную эксплуатацию.

Самым критичным элементом конструкции ТМВД с точки зрения ее радиационной безопасности является ампула, поскольку смесь изотопов водорода в ней может находиться при температуре 800 К и давлении до 120 МПа. Вследствие диффузии через стенку тритий может выходить за пределы ампулы. Для исключения этого явления корпус ампулы (см. рис. 2) выполнен двухслойным, с организацией на границе раздела этих слоев специальной вакуумированной полости Д, из которой производится откачка диффундирующей из вкладыша ампулы рабочей смеси. В то же время корпус ампулы имеет прочностные характеристики, позволяющие сохранять его целостность при разрушении установленного в него вкладыша. В этом случае рабочая смесь по вакуумируемым каналам утилизируется КПГС. Ампула и охладитель расположены в герметичном защитном вакуумируемом кожухе, что обеспечивает утилизацию трития КПГС в случаях его несанкционированного проникновения во внутреннюю полость кожуха. Таким образом, в ТМВД конструктивно на пути возможного проникновения трития из внутренней полости ампулы в атмосферу организовано три рубежа защиты: стенки вкладыша ампулы; стенки корпуса ампулы и водородного объема; стенки защитного кожуха.

Газовые коммуникации, предназначенные для подачи рабочей смеси из КПГС в ампулу ТМВД, оборудованы двумя рубежами защиты. В качестве второго рубежа используется колпак ТМВД, соединенный с боксом КПГС. При этом трубопровод между КПГС и ТМВД заключен в герметичный металлорукав с рабочим давлением 4 МПа.

Вторым рубежом защиты оснащена и магистраль Б (рис. 1), предназначенная в одном из режимов эксплуатации для утилизации диффундирующего из ампулы трития.

#### Результаты испытаний и эксплуатации ТМВД

В процессе отработки мишени проводились разносторонние исследования элементов ее конструкции на макетах. При диффузионных испытаниях было установлено, что максимальная величина проницаемости дейтерия через вкладыш ампулы составляет  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{с} \cdot \text{атм}^{1/2}$  при давлении 100 МПа и температуре 873 К. Проникновения дейтерия за пределы корпуса ампулы, при чувствительности методики на уровне  $2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ , обнаружено не было.

При определении несущей способности ампулы после 200-часовой выдержки под давлением водорода 100 МПа при температуре 873 К двух макетов ампулы с толщиной стенки на 2 мм меньше штатной давление разрушения составило 340 и 315 МПа. Давление разрушения штатной ампулы в исходном состоянии составило 447 МПа. Во всех трех случаях разрушение вкладыша произошло без разгерметизации корпуса ампулы.

За время проведения длительных и многоплановых испытаний и экспериментов на фазотроне ЛЯП ОИЯИ длительностью 150 часов получены следующие результаты.

Охлаждение мишени от комнатной температуры до 20 К занимает 2 часа и требует 10 литров жидкого гелия. Для очистки в КПГС и последующего сжижения 16,5 л рабочей смеси требуется 40 мин. Нагрев мишени от 20 К до 800 К занимает 1,5 часа.

На рис. 5 приведен спектр электронов от распада мюонов, остановившихся в мишени. Из него видно, что конструкция мишени и примененные в ней конструкционные материалы позволяют с достаточной эффективностью проводить ядерно-физические измерения мюонного катализа ядерных реакций синтеза.

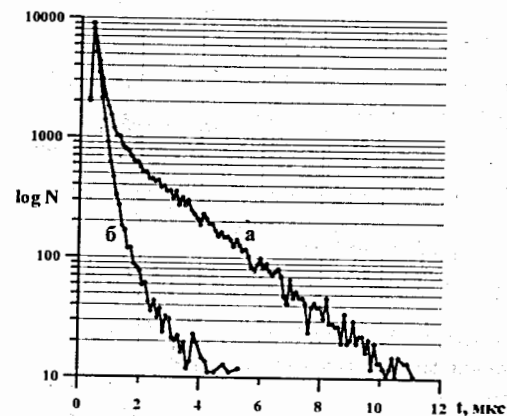


Рис. 5. Временной спектр электронов распада:  
а) мишень заполнена дейтерием при давлении 100 МПа и температуре 300 К;  
б) пустая мишень

#### Заключение

На мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ с использованием ТМВД проведена серия экспериментов по исследованию мюонного катализа ядерных реакций синтеза в плотной смеси изотопов водорода при температурах до 800 К. Давление рабочей смеси при этом достигало до 120 МПа. В процессе 200-часовой эксплуатации ТМВД никаких отказов в ее работе не наблюдалось.

Авторы выражают благодарность: Н.Ю.Кострикиной и А.Н.Костюкову за отработку технологий нанесения покрытия нитридом титана и пайки узлов ТМВД; Л.А.Подсезерцеву за отработку технологии сварных соединений узлов ТМВД; Н.В.Асабову, Н.В.Афанасьеву, А.И.Беляеву, Г.Ф.Беляшкину, С.В.Златоустовскому, Ю.М.Сумарокову и Л.Н.Стефановой за помощь в изготовлении ТМВД; А.Н.Макущенко, А.Д.Матвищу и И.И.Сухому за помощь в выборе конструкций нагревателей и их технологии сборки; А.А.Парамонову за отработку методики температурных измерений; В.М.Першиной и С.В.Курицыну за помощь при разработке КД; А.В.Вдовиченко за помощь при выборе оптимальной компоновки охладителя ТМВД; Г.И.Карякину и В.И.Панькину за разработку конструкции водородной емкости; Н.Н.Графову, А.М.Демину, В.Г.Клевцову, С.В.Медведю, В.А.Назарову, В.И.Пряничникову и А.И.Пугачеву за помощь при проведении функциональных и криогенных испытаний ТМВД. Особую благодарность авторы выражают руководителю проекта проф. Пономареву Л.И. за постоянное внимание и помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект №25-95).

## Литература

- [1] V.M.Bystritsky, V.P.Dzelepov et al., Sov.Phys. JETP 49 (1979) 232;  
D.V.Balin et al., Muon Cat. Fusion 2 (1988) 241.
- [2] V.M.Bystritsky, V.P.Dzelepov et al., Sov.Phys. JETP 53 (1979) 877;  
S.E.Jones et al., Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 1757;  
C.Petitjean et al., Muon Cat. Fusion 2 (1988) 37;  
V.P.Dzelepov et al., Muon Cat. Fusion 7 (1992) 387.
- [3] S.E.Jones, Muon Cat. Fusion 1(1987) 21.
- [4] A.A.Yukhimchuk and V.N.Lobanov. Tritium handling. Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 661-668.
- [5] А.А.Юхимчук, В.А.Апасов, Ю.И.Виноградов и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. Препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ 64-98, Саров, 1998.
- [6] Д.С.Циклис. "Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях". М., "Химия", 1976, стр.63-65.
- [7] Патент Японии №5065037, "Изобретения стран мира", №3, 1996, МКИ G21F9/02;  
Патент Японии №5-19678, "Изобретения стран мира", №5, 1995, МКИ G21F3/00;  
Патент Великобритании №2117169, опубликован 5.1.83г., МКИ G21F9/02;  
Заявка на изобретение №97113426 с приоритетом от 05.08.97г.
- [8] Н.Н.Графов, В.Г.Гребинник, Д.Л.Демин и др. Препринт ОИЯИ Р13-97-243, Дубна, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 апреля 1998 года.