

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.664:539.893:621.78-97

ЖИДКОТРИТИЕВАЯ МИШЕНЬ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИЙ $p\mu$ -СИНТЕЗА

© 2019 г. А. А. Юхимчук^{a,*}, И. П. Максимкин^a, Р. К. Мусяев^{a,**}, И. Л. Малков^a,
В. В. Балугев^a, С. В. Фильчагин^a, О. П. Вихлянцев^a, А. В. Курякин^a, А. Д. Тумкин^a,
А. И. Гуркин^a, А. В. Бучирин^a, Д. Л. Демин^b, А. Д. Конин^b

^a РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики

Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

^b Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: arkad@triton.vniief.ru

**e-mail: rmysyaev@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.

После доработки 08.01.2019 г.

Принята к публикации 23.02.2019 г.

Для исследований $p\mu$ -синтеза в РФЯЦ-ВНИИЭФ была разработана жидкотритиевая мишень, которая в 2016 г. на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ штатно отработала более 270 ч, подтвердив соответствие предъявленным требованиям и корректность предложенных технических решений. Мишень при максимальном рабочем давлении до 4 МПа с объемом облучаемой ампулы до 80 см³ и тремя рубежами защиты позволяет сжигать до 40 л смеси изотопов водорода и поддерживать температуру в диапазоне 20–22 К с точностью не хуже ± 0.05 К. По результатам экспериментов $p\mu$ -синтеза впервые обнаружен канал реакций с выходом электрон-позитронных пар, а также получено указание на существование нового канала реакций с выходом пары γ -квантов.

DOI: 10.1134/S0032816219040335

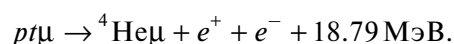
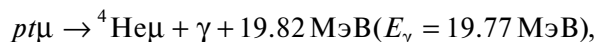
1. ВВЕДЕНИЕ

Реакция перезарядки $p + t = {}^3\text{He} + n$ впервые наблюдалась в 1949 г. [1], а первая ядерная реакция синтеза протона и тритона $p + t = {}^4\text{He} + \gamma$ — годом позже [2]. Первые представления о возможных наблюдениях других каналов реакции синтеза протона и тритона при помощи мюонов (явление мюонного катализа или “ μ -катализ”) сложились в начале 1960-х гг. [3].

Мюонный катализ является эффективным методом изучения процессов синтеза изотопов водорода, особенно при низких “астрофизических” энергиях относительного движения ядер. Поэтому μ -катализ позволяет наблюдать наиболее широкий спектр процессов ядерного синтеза в среде изотопов водорода. Единственный эксперимент по изучению μ -катализа в Н/Т-смеси был проведен международной группой экспериментаторов в PSI (Швейцария, 1993 г.) [4]. В результате измерений наблюдались два выходных канала этой реакции: М1-переходы с испусканием γ -кванта и впервые Е0-переходы — с конверсией мюона. Измеренные выходы этих каналов реакции существенно превысили ожидаемые значения, как основанные на экспериментальных данных по ра-

диационному захвату pt “на лету” и реакции $n + {}^3\text{He}$, зеркальной по отношению к радиационному каналу реакции $p + t$, так и вычисленные из данных по ${}^4\text{He}(e, e')pt$ -реакции (для конверсионного канала). Объяснение этому факту не найдено до сих пор. Кроме того, не наблюдался канал конверсии с образованием пар e^+e^- , хотя его выход предсказан на уровне выхода мюонов [3].

Оставшиеся нерешенными проблемы описания $p\mu$ -синтеза с участием мюона заинтересовали группу ученых по изучению экзотических ядерных реакций в ЛЯП ОИЯИ, выступивших с предложением исследовать следующие каналы реакции $p\mu$ -синтеза:



Совместный коллектив ОИЯИ и РФЯЦ-ВНИИЭФ, созданный для проведения эксперимента, имел положительный опыт сотрудничества по решению проблемы μ -катализа и весомый задел [5–10] для успешной реализации эксперимента. Для

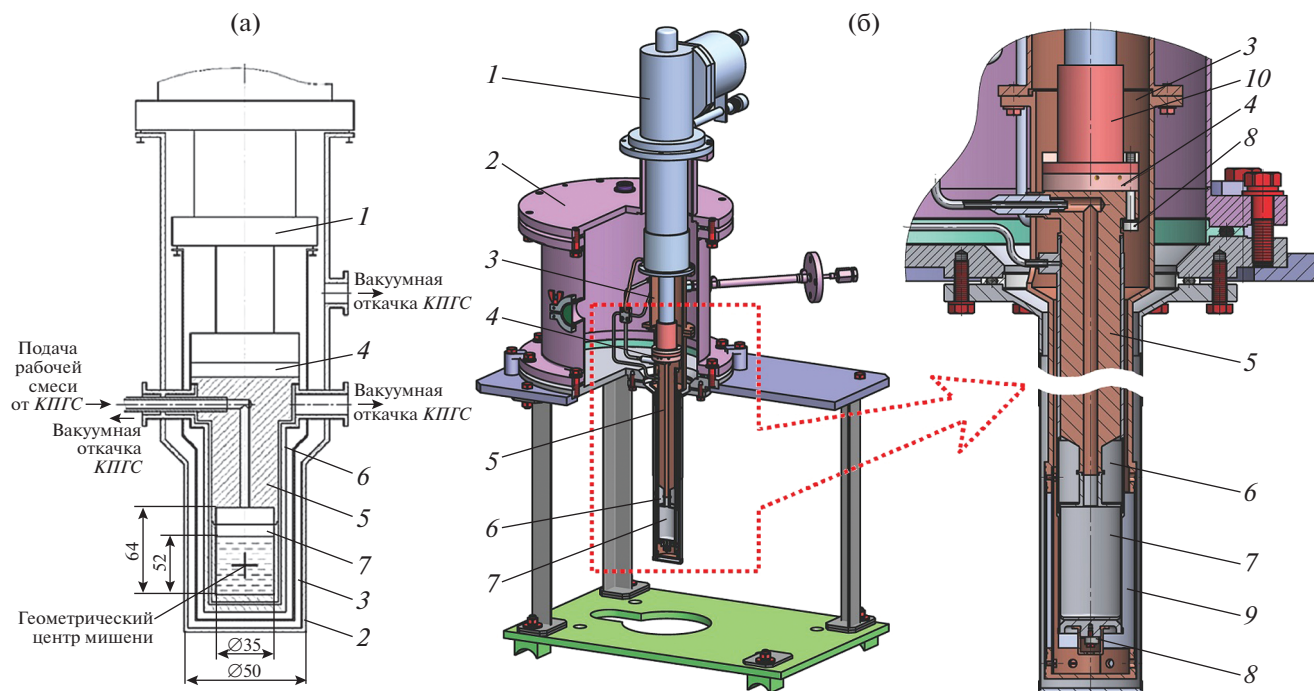


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и конструктивное исполнение (б) ж.т.м.: 1 – криорефрижератор COOLPOWER 4.2 G; 2 – кожух вакуумный; 3 – экран радиационный; 4 – нагреватель; 5 – хладопровод; 6 – кожух ампулы; 7 – ампула; 8 – термодиоды; 9 – майлар (3 слоя); 10 – гелиевая ступень криорефрижератора.

обеспечения эксперимента в ЛЯП ОИЯИ были созданы детекторы γ -излучения с диапазоном измерений до 30 МэВ, а сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ для установки ТРИТОН [5] разработана специальная жидкотритиевая мишень (ж.т.м.), описанию которой и посвящена данная работа. Детальное описание методики эксперимента на стадии подготовки содержится в работе [11].

2. КОНСТРУКЦИЯ ЖИДКОТРИТИЕВОЙ МИШЕНИ

Жидкотритиевая мишень представляет собой устройство (рис. 1), позволяющее: сжимать подаваемую из комплекса подготовки газовой смеси КППС установки ТРИТОН смесь изотопов водорода (и.в.); накапливать смесь в жидком состоянии в ампуле мишени, где происходит ее облучение мюонами и протекание исследуемых реакций; поддерживать заданную температуру сжиженной смеси и.в. в течение эксперимента; утилизировать сжиженную смесь и.в. путем медленного испарения и эвакуации ее в КППС. При этом для обеспечения радиационной безопасности на любом возможном пути выхода газа из объема мишени в воздушную среду рабочих помещений должно быть обеспечено три рубежа защиты.

Согласно требованиям, которые определялись необходимыми физическими параметрами эксперимента, техническими возможностями КППС

установки ТРИТОН и требованиями радиационной безопасности, ж.т.м. должна иметь следующие технические характеристики:

- максимальное давление в объеме мишени 4 МПа;
- максимальное давление во втором рубеже защиты <0.1 МПа;
- максимальное давление в третьем рубеже защиты <0.1 МПа;
- рабочая температура мишени 20–22 К;
- точность поддержания температуры во времени ± 0.3 К;
- рабочее количество изотопов водорода в мишени ~40 л;
- максимальное количество трития в мишени ≤ 400 см³ н.у. (~1000 Ки);
- время непрерывной работы мишени за один сеанс ≥ 100 ч;
- внутренний объем рабочей части ампулы ж.т.м., занятый и.в. в жидком состоянии, ~50 см³;
- на пути мюонного пучка должно быть минимальное количество конструкционных материалов, а последние должны содержать минимальное количество элементов с $Z < 20$.

Жидкотритиевая мишень располагается на выходе мюонного тракта фазотрона ЛЯП ОИЯИ и монтируется в фокусе мюонного пучка на подвижной опорной конструкции (фокус пучка мю-

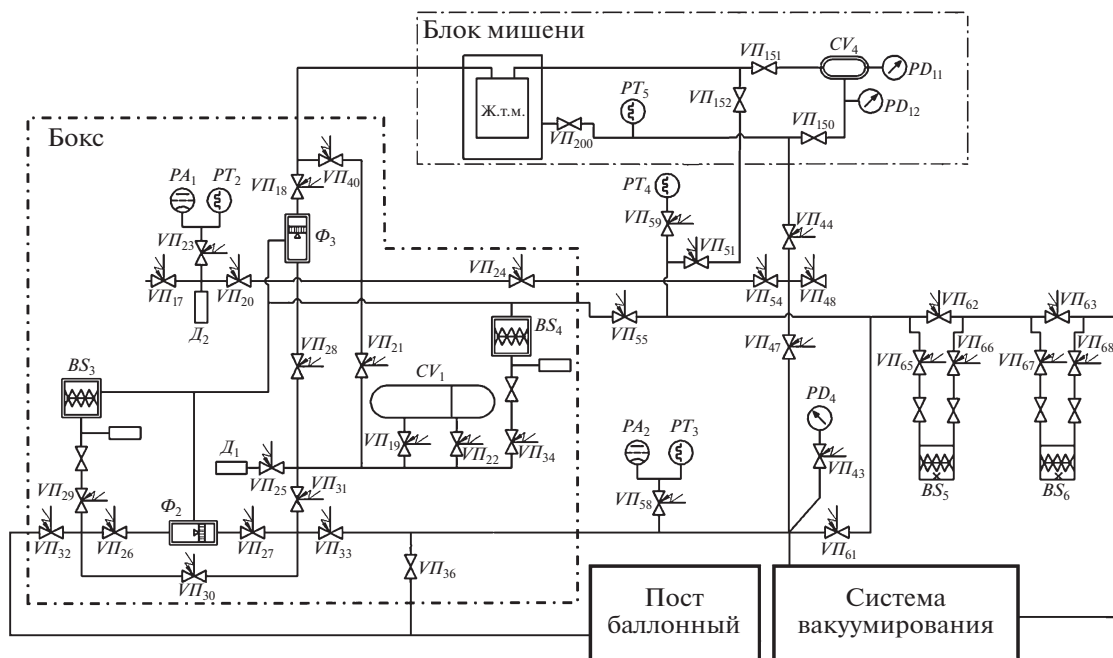


Рис. 2. Фрагмент схемы газовых коммуникаций КПГС [5] установки ТРИТОН. *BS* – металлгидридные генераторы (ловушки) изотопов водорода с нагревателями; *VPI* – вентили; Φ – диффузионные палладиевые фильтры; *D* – датчики низкого давления (типа “Сапфир”); *PT* – термовакуумметрические датчики; *PA* – ионизационные вакуумные датчики; *PD* – датчики высокого давления; *CV* – калиброванные емкости.

онов – точка наибольшей плотности потока мюонов на выходе из тракта).

Жидкотритиевая мишень (см. рис. 1) включает в себя тонкостенную ампулу мишени, которая во время проведения эксперимента содержит жидкую смесь и.в. (протий-тритиевую) требуемого состава. Над ампулой мишени находится медный хладопровод 5, охлаждаемый сверху криорефрижератором 1, криоголовка которого герметично введена в вакуумный кожух 2. В хладопроводе 5 происходит конденсация и.в. из газовой фазы, после чего они в сжиженном состоянии по вертикальному каналу поступают в ампулу мишени. Между криорефрижератором 1 и хладопроводом 5 расположен нагреватель 4, служащий для регулировки и поддержания заданной температуры (криорефрижератор работает с постоянной хладопроизводительностью). Тепловое соединение криоголовки, нагревателя и хладопровода осуществляется через индиевые прокладки. Температура определяется по сигналу двух термодиодов 8, один из которых закреплен на кожухе ампулы под мишенью, а второй – на фланце хладопровода, непосредственно около нагревателя. Температура в рабочем объеме ампулы мишени и коммуникациях мишени в ходе эксперимента не должна опускаться ниже 20.6 К (точка замерзания трития).

Для обеспечения безопасности работ с тритийсодержащей смесью ампула мишени окруже-

на герметичным объемом – кожухом 6 ампулы (второй рубеж защиты), обеспечивающим возможность утилизации смеси, попавшей в этот герметичный объем. Кожух ампулы соединен с водородной емкостью *CV*₄ системы КПГС (рис. 2). Снаружи второго рубежа защиты находится радиационный экран 9, уменьшающий тепловые потери и представляющий собой медную цилиндрическую конструкцию, соединенную с азотной ступенью криорефрижератора и закрытую несколькими слоями полимерного материала – майлара.

Для исключения выхода трития в среду рабочего помещения при нарушении герметичности второго рубежа предусмотрен вакуумный кожух 2, в котором давление в случае разгерметизации мишени не должно превысить атмосферного. Он играет роль третьего рубежа защиты и соединен с вакуумным пультом системы КПГС.

Ампула ж.т.м. 7, радиационный экран 9 и вакуумный кожух 2 ж.т.м. имеют цилиндрическую геометрию и расположены вертикально и коаксиально относительно друг друга. При разработке ж.т.м. была обеспечена минимально возможная (исходя из прочностных характеристик) толщина стенок конструктивных элементов мишени на пути продуктов реакции (она составляет 1.1 мм и складывается из толщины стенок ампулы – 0.4 мм, ее кожуха – 0.2 мм и вакуумного кожуха – 0.5 мм).

В качестве материала стенок ампулы мишени и вакуумного кожуха используется сталь 12Х18Н10Т-ВД, а

для материала радиационных экранов – бескислородная медь, покрытая никелем, и тонкий (~2 мкм) алюминизированный майлар.

Трубки, служащие для подвода и.в. и для организации второго рубежа защиты мишени, соединены медным теплопроводом с азотной ступенью криорефрижератора и также укутаны майларом для обеспечения минимального теплового потока, приходящего на ампулу мишени.

3. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Управление установкой ТРИТОН осуществлялось при помощи автоматизированной системы контроля и управления, разработанной в 1997 г. [12]. В ходе подготовки к многочисленным физическим экспериментам система подвергалась неоднократной модернизации в 2000, 2012 и 2015 гг. и показала хорошие эксплуатационные характеристики, высокую надежность и возможность быстрой адаптации для решения новых задач.

В составе системы, использовавшейся в экспериментах 2016 г., можно выделить:

- подсистему контроля и управления элементами *КПГС*;
- подсистему контроля и управления мишени;
- подсистему радиометрического контроля объемной активности трития.

Подсистема *КПГС* включает в себя 20 каналов управления нагревателями генераторов BS_3 – BS_6 и диффузионных палладиевых фильтров Φ_2 , Φ_3 (см. рис. 2). Мощность нагрева задается программно и управляется регуляторами мощности методом широтно-импульсной модуляции с периодом 2–5 с. Модулирующий сигнал формируется компьютером и подается на регуляторы через многоканальный модуль дискретного вывода I-7043. Температура нагрева измеряется с помощью термопар, вакуум в системе – при помощи четырех термовакуумметрических ламп ПМТ-4М, высокие давления – тензометрическими датчиками, а низкие (до 10 атм) – датчиками типа “Сапфир”. Термо-э.д.с. и выходные сигналы с датчиков регистрируются модулями аналогового ввода I-7018. Для контроля положений 52-х вентилях используется плата типа DIO-144.

Подсистема мишени обеспечивает работу с мишенями всех типов при проведении экспериментов в широком диапазоне температур и давлений. Температура мишени измеряется двумя кремниевыми диодами, подключенными через стабилизатор тока на 10 мкА. Точность измерения диапазона 1.4–300 К составляет ± 0.1 К в диапазоне 2–100 К и ± 1 К в диапазоне выше 100 К. Для регулирования и стабилизации температуры используются 2 нагревателя с максимальной мощностью 25 Вт. Управление мощностью осуществляется многоканальным модулем аналогового вывода I-7024.

В качестве аналоговых усилителей мощности используются управляемые источники питания постоянного тока. Давление в кожухе мишени измеряется датчиками фирмы “Balzers”, подключенными к компьютеру через 6-канальный контроллер TRG-256.

Для контроля объемной активности трития в газовых коммуникациях и помещении установки ТРИТОН использовалась радиометрическая система РДМС [13]. Система основана на 4-канальном автоматизированном радиометре РТА-4, который работает как в автономном режиме, так и в составе распределенной системы регистрации и управления.

Программное обеспечение автоматизированной системы контроля и управления установкой ТРИТОН разработано на базе пакета CRW-DAQ [14], который представляет собой развитую многооконную среду для создания измерительных систем, систем управления и обработки данных. Ядро программного пакета запускается в операционной системе на управляющем компьютере автоматизированной системы контроля и управления.

С помощью программного обеспечения контролируются аналоговые (вакуум, температура, давление) и дискретные (состояние вентилях, клапанов) параметры комплекса. Аналоговые параметры отображаются в текстовой и графической форме в режиме реального времени. Графические окна для отображения аналоговых данных имеют широкие возможности для просмотра и обработки динамических кривых (выбор кривых для просмотра, масштабирование, фильтрация и т.д.). Программа предусматривает непрерывную запись контролируемых параметров на жесткий диск компьютера. Отображение состояний узлов комплекса и управление установкой осуществляются через активные графические мнемосхемы.

4. ПРОЧНОСТНАЯ ОТРАБОТКА Ж.Т.М.

В соответствии с предъявленными требованиями мишень должна остаться герметичной при работе под давлением смеси изотопов водорода до 2 МПа при проведении физического сеанса в течение ≥ 100 ч в диапазоне температур 20–300 К. Прочностная отработка мишенного блока жидкотритиевой мишени проводилась с использованием макета ампулы (далее по тексту – макет), изображенного на рис. 3. Для выполнения работ было изготовлено три макета ампулы (№ 1–№ 3). Согласно проведенному прочностному расчету, ампула мишенного блока полностью удовлетворяет требованиям по прочности, а давление разрушения составило ≥ 15 МПа.

Первоначально ампулу проверяли на герметичность на гелиевом течеискателе ТИ1-14М ме-

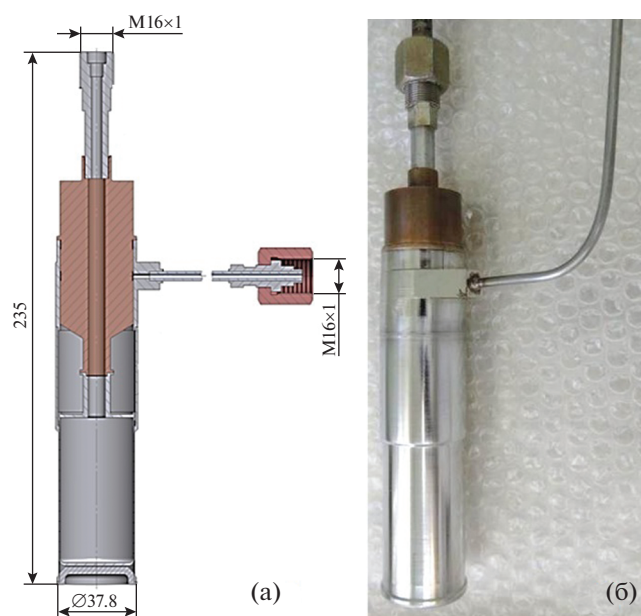


Рис. 3. Макет ампулы: а – схема устройства, б – внешний вид.

тодом обдува гелием при установленной чувствительности прибора $\geq 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. При первоначальной проверке сварные и паяные швы всех трех макетов были герметичными. Испытание на прочность и герметичность давлением водорода 2.5 МПа с выдержкой в течение 10 мин все макеты прошли без разрушения и потери герметичности, падения давления в процессе выдержки не наблюдалось.

Макет № 1 после испытаний на прочность был испытан на несущую способность давлением водорода, разрушение макета произошло при давлении 16 МПа. Фотография макета № 1 после разрушения представлена на рис. 4. Макеты № 2 и № 3 после испытаний на прочность и герметичность подвергали термоциклированию (10 циклов) с целью оценки влияния данного процесса на их герметичность и прочность. Изменение температуры макета при термоциклировании показано на рис. 5.

Перед термоциклированием макеты заполняли водородом до давления 2 МПа при комнатной температуре, после чего выполняли термоциклирование по следующей схеме:

- нагрев макета до температуры 323 К (50°C) и выдержка при ней 30 мин (участок I на рис. 5);
- охлаждение макета путем погружения в жидкий азот с выдержкой при температуре жидкого азота в течение 10 мин (участок II на рис. 5);
- отопление макета на воздухе до комнатной температуры (участок III на рис. 5);



Рис. 4. Внешний вид макета ампулы № 1 после испытаний на несущую способность.

– через 24 часа (с момента начала нагрева мишени до температуры 323 К) повторяли цикл.

В ходе термоциклирования проводился непрерывный контроль давления водорода внутри ампулы при захлаживании макета до температуры жидкого азота и отоплении до комнатной температуры.

После завершения термоциклирования макеты (№ 2 и № 3) проверяли на герметичность на ге-

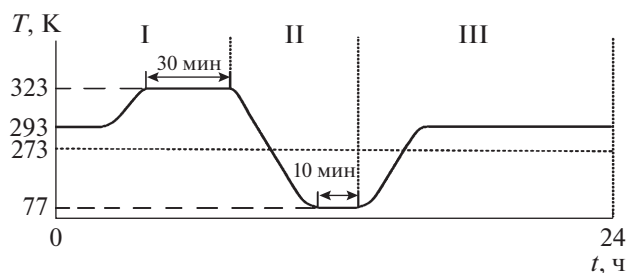


Рис. 5. Изменение температуры макета ампулы при термоциклировании.

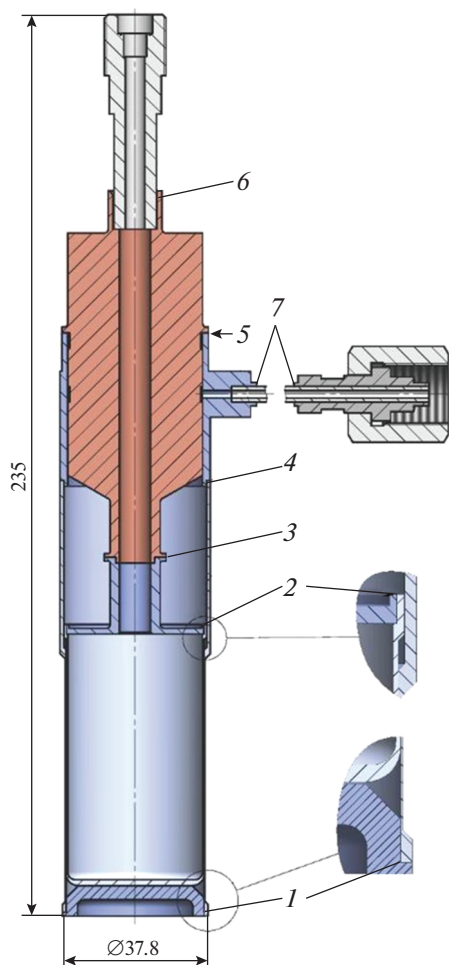


Рис. 6. Сварные и паяные соединения макета ампулы: 1–5 – электронно-лучевая сварка (глубина провара ≥ 0.8 мм); 6 – пайка (глубина пропая ≥ 6 мм); 7 – аргодуговая сварка.

лиевом течеискателе, а также на прочность и герметичность давлением водорода 2.5 МПа с выдержкой в течение 10 мин. Испытания макеты успешно выдержали. Затем макеты № 2 и № 3 были испытаны на несущую способность. Разрушение произошло при давлении водорода ~ 20 МПа. Таким образом, было показано, что термоциклирование не влияет на герметичность и прочностные характеристики разработанной конструкции.

После испытаний на несущую способность макета № 1 все его сварные и паяные соединения (рис. 6) подвергали металлографическому исследованию, цель которого – определение фактических размеров сварных и паяного соединений.

Результаты металлографических исследований показали следующее:

– разрушений сварных и паяного соединений после испытаний макета (№ 1) на несущую способность не произошло;

– все сварные соединения удовлетворяют предъявленным требованиям: глубина провара ≥ 0.8 мм, глубина пайки ≥ 6 мм.

Типичная микроструктура сварных и паяного соединений приведена на рис. 7.

Грубые дефекты сварных и паяного соединений (трещины и непровары), которые могут оказать влияние на прочность сварного шва, не обнаружены. В некоторых сварных швах выявлены допустимые дефекты в виде отдельных пор.

Таким образом, проведенная прочностная обработка и металлографические исследования сварных швов показали полное соответствие разработанной жидкотритиевой мишени предъявленным требованиям.

5. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ Ж.Т.М.

Эксперименты с мишенью начинались с вакуумирования ее газовых коммуникаций, внутренней полости и вакуумного кожуха до остаточного давления $\leq 5 \cdot 10^{-2}$ Па. После этого проводилась процедура захлаживания мишени с помощью гелиевого криорефрижератора. На рис. 8 представлен типичный график изменения температуры мишени в процессе захлаживания, заполнения мишени протий-тритиевой (Н/Т) смесью и дальнейшей выдержки при заданной температуре.

Графики T_1 и T_2 на рис. 8 соответствуют показаниям термодиодов, один из которых размещен на доньшке второго рубежа защиты мишени (T_1), а второй – в области контакта мишени с криоголовкой (T_2). Согласно графикам, время, необходимое для захлаживания мишени до температуры 22 К и стабилизации при этом значении, составило ~ 2.5 ч.

После достижения требуемой температуры ампулы мишени система охлаждения переводится в режим термостабилизации, для чего используются специальные электроннагреватели, управляемые автоматической системой контроля и управления установки ТРИТОН. Стабилизация температуры мишени по термодиоду T_2 в течение всего сеанса осуществлялась с точностью ± 0.03 К. Незначительные скачки температуры мишени по термодиоду T_2 (на рис. 8 в период 200–300 мин) связаны с заполнением мишени Н/Т-смесью. При дальнейшей выдержке мишени при температуре 22 К (по термодиоду T_2) в течение всего сеанса колебания температуры не превышали ± 0.05 К.

При стабилизации температуры мишени при значении 22 К по термодиоду T_2 температура по термодиоду T_1 стабилизировалась при значении ~ 30 К. Различие температур связано с тем, что между доньшком второго рубежа защиты мишени, на котором установлен термодиод T_2 , и до-

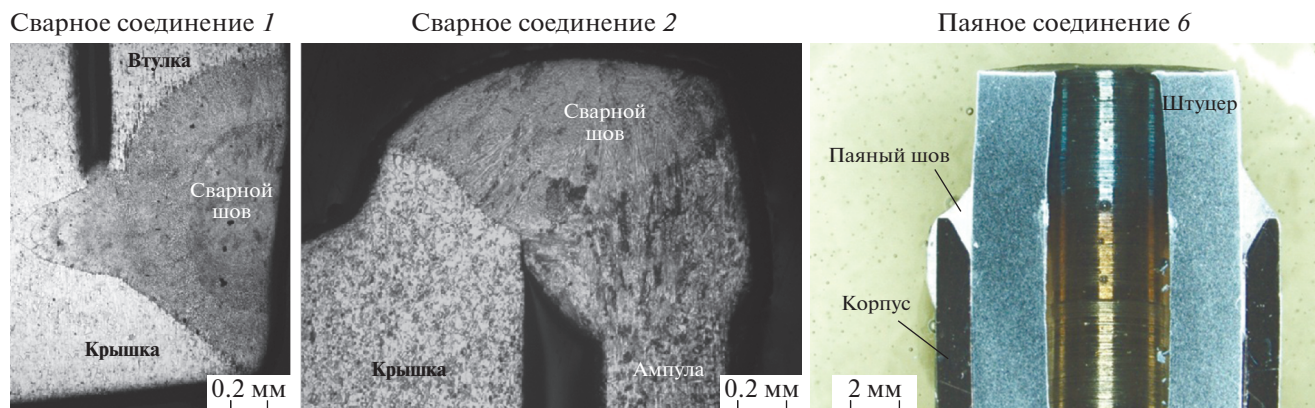


Рис. 7. Типичная микроструктура сварных (1, 2) и паяного (6) соединений макета ампулы № 1. Номера соединений соответствуют рис. 6.

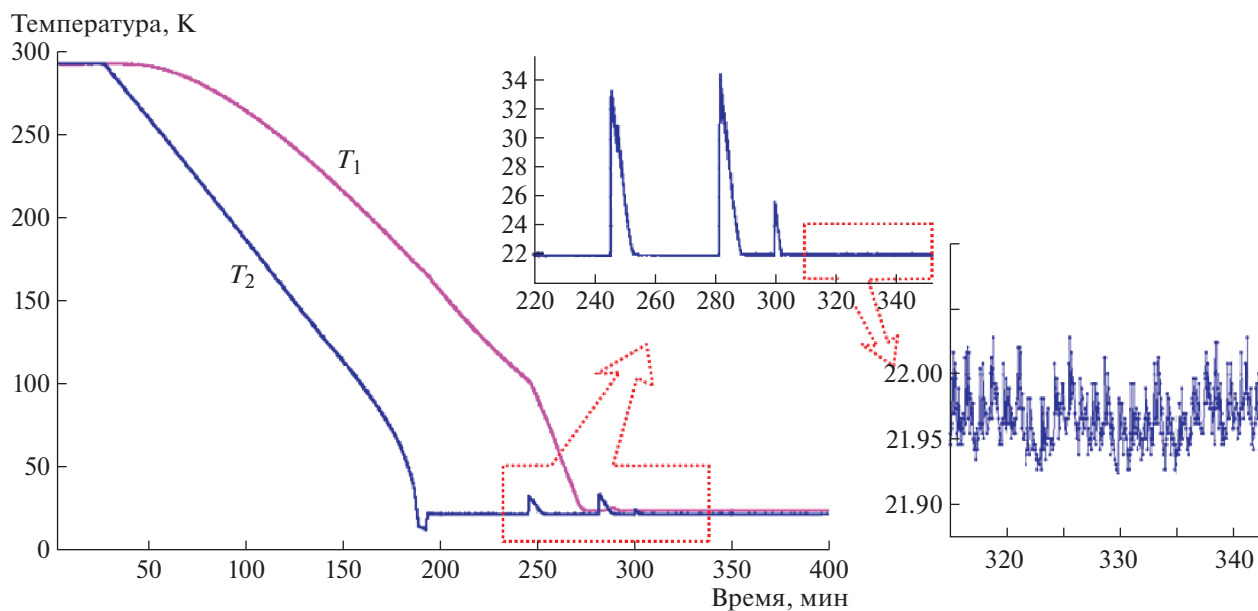


Рис. 8. График типичного изменения температуры мишени по показаниям термодиодов T_1 , T_2 при охлаждении, заполнении Н/Т-смесью и дальнейшей выдержке при заданной температуре.

нышком самой мишени имеется зазор, который находился под вакуумом ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па).

Заполнение мишени Н/Т-смесью проводили в несколько этапов, предварительно запаса смесь в емкости известного объема (CV_1 на рис. 2). Суммарное количество газа в мишени в жидкой фазе составляло ~ 40 л. (н.у.), при этом дополнительно в газовой фазе находилось еще ~ 3 л. (н.у.) газовой смеси. Давление газовой фазы в мишени стабилизировалось на уровне 150–155 кПа (равновесное давление между жидкой и газовой фазой Н/Т-смеси) и сохранялось при этом значении в течение всего сеанса.

После заполнения ампулы мишени нужным количеством протий-тритиевой смеси осуществ-

лялась экспозиция мишени мюонным пучком и дальнейшая регистрация физических параметров эксперимента.

Жидкотритиевая мишень использовалась в двух сеансах 2016 г., различающихся концентрацией трития в Н/Т-смеси, которой заполняли мишень. Содержание трития в смеси, давление газа над смесью и длительность сеансов представлены в табл. 1.

Большая продолжительность второго сеанса была вызвана необходимостью проведения дополнительной экспозиции с измененным местоположением регистрирующей аппаратуры для фиксации угловой корреляции γ -квантов.

По завершении сеанса и набора необходимой статистики проводилась процедура отепления

Таблица 1.

Номер сеанса	Содержание трития, %	Давление, кПа	Длительность сеанса, ч
1	0.84 ± 0.01	155–156	>90
2	0.1 ± 0.01	152–154	>180

мишени и поглощение смеси и.в. на ловушку BS_5 (см. рис. 2) КППС. При отоплении мишени для уменьшения времени проведения данного процесса были задействованы электронагреватели, находящиеся на мишени. Время отопления мишени до комнатной температуры составило ≤ 3 ч (рис. 9).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследований $p\mu$ -синтеза в РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ОИЯИ создана жидкотритиевая мишень со следующими рабочими параметрами:

- количество и.в. в мишени ~ 40 л (н.у.);
- точность поддержания температуры во времени не хуже ± 0.05 К;
- максимальное давление в объеме мишени ≤ 4 МПа;
- время захлаживания 2.5 ч, отопления – 3 ч.

Для обеспечения безопасности при работах с тритийсодержащими смесями конструкция мишенного блока окружена тремя рубежами защиты, исключающими попадание и.в. в воздушную среду рабочих помещений и обеспечивающими возможность утилизации тритийсодержащей смеси.

С использованием данной ж.т.м. в 2016 г. на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведено два сеанса общей продолжительностью более 270 ч, в ходе которых мишень отработала в штатном режиме, подтвердив соответствие предъявленным

требованиям и корректность предложенных технических решений.

В проведенных экспериментах на мишени наблюдались известные ранее каналы реакции $p\mu$ -синтеза с выходом одиночных γ -квантов и мюонов конверсии, а также впервые обнаружен канал с выходом электрон-позитронных пар и получено указание на существование нового канала с выходом пары γ -квантов ($p\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma + \gamma + 19.82$ МэВ). Предварительные результаты подтверждают теоретические предсказания Я.Б. Зельдовича и С.С. Герштейна о продуктах выхода в ядерных реакциях в холодном водороде с участием мюонов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают огромную благодарность А.М. Демину – бывшему сотруднику ФГП РФЯЦ-ВНИИЭФ, находящемуся в данный момент на заслуженном отдыхе и внесшему большой вклад в подготовку и проведение данных экспериментальных исследований.

8. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-02-00089-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taschek R.F., Jarvis G.A., Hemmendinger A., Everhart G.G., Gittings H.* // Physical Review. 1949. V. 75. № 9. P. 1361.
2. *Argo H.V., Gittings H.T., Hemmendinger A., Jarvis G.A., Taschek R.F.* // Physical Review. 1950. V. 78. № 6. P. 691.
3. *Зельдович Я.Б., Герштейн С.С.* // УФН. 1960. Т. LXXI. № 4. С. 581.
4. *Baumann P., Daniel H., Grunewald S., Hartmann F.J., Lipowsky R., Moser E., Schott W., von Egidy T., Ackerbauer P., Breunlich W.H., Fuchs M., Jeitler M., Kammel P., Marton J., Nagele N. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 3720.
5. *Юхимчук А.А., Апасов В.А., Виноградов Ю.И., Голубков А.Н., Горностаев Е.В., Гришечкин С.К., Дракин Л.В., Загоруйко Н.А., Истратов В.Н., Ишков П.Д., Кононенко А.А., Карякин Г.И., Клевцов В.Г., Клищ В.А., Лобанов В.Н. и др.* // ПТЭ. 1999. № 6. С. 17.
6. *Перевозчиков В.В., Юхимчук А.А., Ганчук Н.С., Гребинник В.Г., Гришечкин С.К., Демин Д.Л., Зинов В.Г., Ишков П.Д., Лобанов В.Н., Малков И.Л., Тихонов В.И., Хабаров Ю.А.* // ПТЭ. 1999. № 1. С. 28.

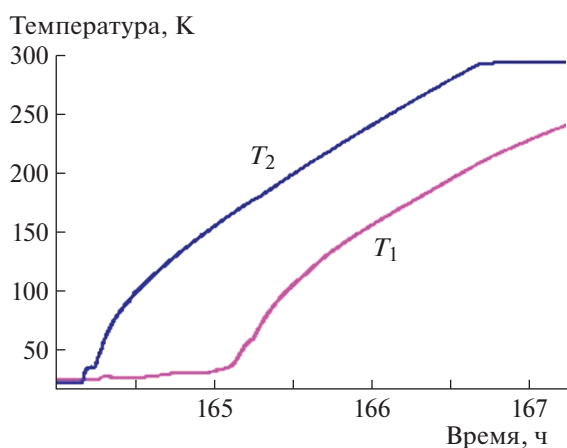


Рис. 9. График изменения температуры по показаниям термодиодов T_1 , T_2 при отоплении мишени.

7. *Перевозчиков В.В., Юхимчук А.А., Виноградов Ю.И., Вихарев М.Д., Ганчук Н.С., Голубков А.Н., Гришечкин С.К., Демин А.М., Демин Д.Л., Зинов В.Г., Кононенко А.А., Лобанов В.Н., Малков И.Л., Юхимчук С.А.* // ПТЭ. 2002. № 4. С. 155.
8. *Yukhimchuk A.A., Tumkin D.P., Boitsov I.Ye., Vinogradov Yu.I., Grishechin S.K., Perevozchikov V.V., Demin A.M., Demin D.L., Zhuravlev S.M., Zinov V.G., Zlatoustovsky S.V., Malkov I.L., Pershina V.M., Safronov V.A., Solyankin V.M. et al.* // Fusion Science and Technology. 2005. V. 48. № 1. P. 294. <https://doi.org/10.13182/FST05-A930>
9. *Perevozchikov V.V., Yukhimchuk A.A., Vinogradov Yu.I., Grishechin S.K., Demin D.L., Zinov V.G., Lobanov V.N., Malkov I.L., Pershina V.M., Yukhimchuk S.A.* // Fusion Science and Technology. 2005. V. 48. № 1. P. 310. <https://doi.org/10.13182/FST05-A934>
10. *Bom V.R., Demin A.M., Demin D.L., van Eijk C.W.E., Faifman M.P., Filchenkov V.V., Golubkov A.N., Grafov N.N., Grishechin S.K., Gritsaj K.I., Klevtsov V.G., Konin A.D., Kuryakin A.V., Medved S.V., Musyaev R.K. et al.* // JETP. 2005. V. 127. № 4. P. 752. <https://doi.org/10.1134/1.1926428>
11. *Bogdanova L.N., Demin D.L., Duginov V.N., Filchenkov V.V., Gritsaj K.I., Konin A.D., Mamedov T.N., Rudenko A.I., Stolupin V.A., Vinogradov Yu.I., Volnykh V.P., Yukhimchuk A.A.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. № 8. P. 605. <https://doi.org/10.1134/S154747711208002X>
12. *Виноградов Ю.И., Арюткин В.С., Курякин В.А., Травкин В.В., Юхимчук А.А., Фильчагин С.В.* // ПТЭ. 2004. № 3. С. 29.
13. *Вихлянец О.П., Виноградов Ю.И., Курякин А.В., Вьюшин А.Н., Сулин А.Н.* // Сб. докладов восьмой международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова IHISM-12 Junior. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2013. С. 260–270.
14. *Курякин А.В., Виноградов Ю.И.* Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ). // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г. <http://www.crw-daq.ru>