

УДК 621.384.664:539.893:621.78-97

DOI: 10.53403/9785951504944_2020_25.2_270_281

Жидкотритиевая мишень для исследования реакций рtμ-синтеза

А. А. Юхимчук, И. П. Максимкин, Р. К. Мусяев, И. Л. Малков, В. В. Балувев, С. В. Фильчагин, О. П. Вихлянцев, А. В. Курякин, А. Д. Тумкин, А. И. Гуркин, А. В. Бучирин

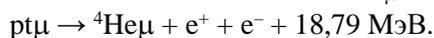
Для исследований рtμ-синтеза в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана жидкотритиевая мишень, которая в 2016 г. на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ штатно отработала более 270 ч, подтвердив соответствие предъявленным требованиям и корректность предложенные технических решений. Мишень при максимальном рабочем давлении 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 рtμ-синтеза впервые обнаружен канал реакций с выходом электрон-позитронных пар, а также получено указание на существование нового канала реакций с выходом пары γ-квантов.

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, поскольку 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 реакции: М1-переходы с испусканием гамма-кванта и – впервые – Е0-переходы с конверсией мюона. Измеренные выходы этих каналов реакции существенно превышают как ожидаемые значения, основанные на экспериментальных данных по радиационному захвату рt «на лету» и реакции $n + {}^3\text{He}$, зеркальной по отношению к радиационному каналу реакции $p + t$, так и вычисленные из данных по реакции ${}^4\text{He}(e, e')pt$ (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 рtμ-синтеза с участием мюона заинтересовали группу экзотических ядерных реакций ЛЯП ОИЯИ, которая выступила с предложением исследовать следующие каналы реакции рtμ-синтеза:



Совместный коллектив ОИЯИ и РФЯЦ-ВНИИЭФ, созданный для проведения эксперимента, имел положительный опыт сотрудничества по проблеме μ -катализа и весомый задел [5–10] для его успешной реализации. Для обеспечения эксперимента в ЛЯП ОИЯИ были созданы детекторы гамма-излучения с диапазоном измерений до 30 МэВ, а сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ для установки «Тритон» [5] была разработана специальная жидкотритиевая мишень (ЖТМ), описанию которой и посвящена данная работа. Детальное описание методики эксперимента на стадии подготовки содержится в работе [11].

Конструкция жидкотритиевой мишени

Согласно требованиям ЖТМ (рис. 1, см также цв. вкл.) 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 $\pm 0,3$ К;
- рабочее количество изотопов водорода в мишени ~ 40 л;
- максимальное количество трития в мишени не более 400 см³ н.у. (~ 1000 Ки);
- время непрерывной работы мишени за один сеанс не менее 100 ч;
- внутренний объем рабочей части ампулы ЖТМ, занятый изотопами водорода (ИВ) в жидком состоянии, ~ 50 см³;
- на пути мюонного пучка должно быть минимальное количество конструкционных материалов, а последние должны содержать минимальное количество элементов с $Z < 20$.

ЖТМ располагается на выходе мюонного тракта фазотрона ЛЯП ОИЯИ и монтируется в фокусе мюонного пучка на подвижном «рейтере» (фокус пучка мюонов – точка наибольшей плотности потока мюонов на выходе из тракта).

ЖТМ (см. рис. 1) представляет собой устройство, позволяющее: сжижать подаваемую из комплекса подготовки газовой смеси (КПГС) установки «Тритон» смесь ИВ; проводить накопление смеси в жидком состоянии в ампуле мишени, где происходит ее облучение мюонами и протекание исследуемых реакций; поддерживать заданную температуру сжиженной смеси ИВ в течение эксперимента; утилизировать сжиженную смесь ИВ путем медленного испарения и эвакуации ее в КПГС. При этом для обеспечения радиационной безопасности на любом возможном пути выхода газа из объема мишени в воздушную среду рабочих помещений должны быть обеспечены три рубежа защиты.

ЖТМ (см. рис. 1) включает в себя тонкостенную ампулу мишени, которая во время проведения эксперимента содержит жидкую смесь ИВ (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 ИВ 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 (криорефриже-

ратор работает с постоянной хладопроизводительностью). Тепловое соединение криоголовки, нагревателя и хладопровода осуществляется через индиевые прокладки. Температура определяется по сигналу двух термодиодов, один из которых закреплен на кожухе ампулы под мишенью 8, а второй установлен 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).

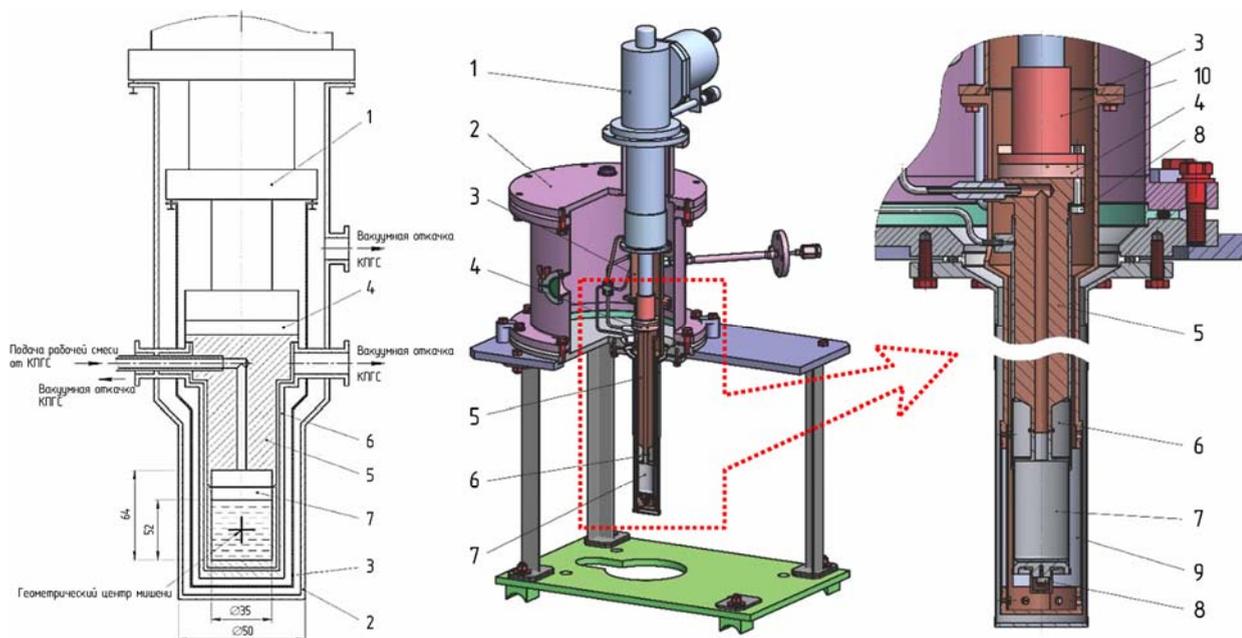


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) ЖТМ: 1 – криорефрижератор COOLPOWER 4.2G, 2 – кожух вакуумный, 3 – экран радиационный, 4 – нагреватель, 5 – хладопровод, 6 – кожух ампулы, 7 – ампула, 8 – термодиоды, 9 – майлар (3 слоя), 10 – гелиевая ступень криорефрижератора COOLPOWER 4.2G

Для обеспечения безопасности работ с тритийсодержащей смесью ампула мишени окружена герметичным объемом – кожухом ампулы 6 (второй рубеж защиты), обеспечивающим возможность утилизации тритийсодержащей смеси, попавшей в этот герметичный объем. Кожух ампулы 6 соединен с водородной емкостью CV4 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 атмосферное. Он играет роль третьего рубежа защиты и соединен с вакуумным пультом системы КПГС.

Ампула ЖТМ 7, радиационный экран 9 и вакуумный кожух ЖТМ 2 имеют цилиндрическую геометрию и располагаются вертикально и коаксиально относительно друг друга. При разработке ЖТМ 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)).

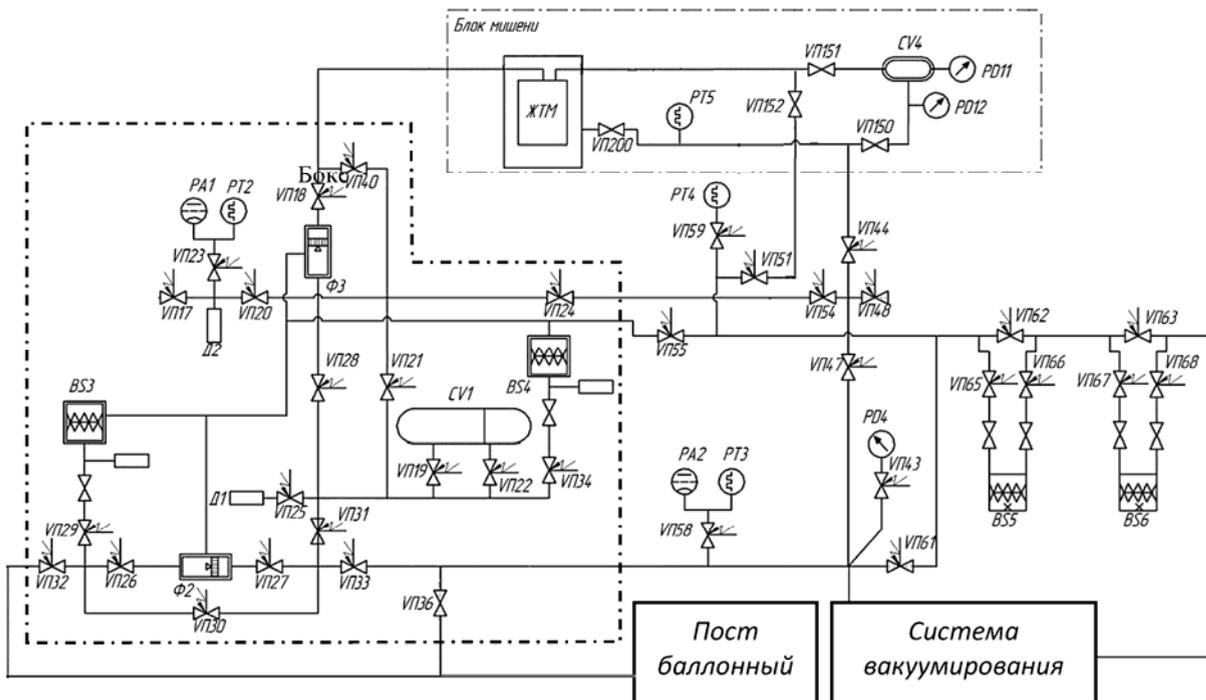


Рис. 2. Фрагмент схемы газовых коммуникаций КПГС [5] установки «Тритон»

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 ИВ и для организации второго рубежа защиты мишени, соединены медным теплопроводом с азотной ступенью криорефрижератора и также укутаны майларом для обеспечения минимального теплового потока, проходящего на ампулу мишени.

Система контроля и управления

Управление установкой «Тритон» осуществлялось при помощи автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ), 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 АСКУ, использовавшейся в экспериментах 2016 г., можно выделить следующие основные подсистемы:

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

Подсистема КПГС включает 20 каналов управления нагревателями генераторов BS3–BS6 и диффузионных палладиевых фильтров Ф2–Ф3 (см. рис. 2). Мощность нагрева задается программно и управляется регуляторами мощности методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с периодом 2–5 с. Модулирующий сигнал формируется компьютером и подается на регуляторы

через многоканальный модуль дискретного вывода типа 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». ТермоЭДС и выходные сигналы с датчиков регистрируются модулями аналогового ввода типа I-7018. Для контроля положений 52 вентилях используется плата типа DIO-144.

Подсистема мишени обеспечивает работу со всеми типами мишеней при проведении экспериментов в широком диапазоне температур и давлений. Температура мишени измеряется двумя кремниевыми диодами, подключенными через стабилизатор тока на 10 мкА. Диапазон измерений от 1,4 до 300 К с точностью измерения в диапазоне от 2 до 100 К составляет $\pm 0,1$ К, а в диапазоне выше 100 К – ± 1 К. Для регулирования и стабилизации температуры используются два нагревателя с максимальной мощностью 25 Вт. Управление мощностью осуществляется многоканальным модулем аналогового вывода типа 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 TPG-256.

Для контроля объемной активности трития в газовых коммуникациях и помещении установки «Тритон» использовалась радиометрическая система РДМС [13], базирующаяся 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 АСКУ.

Программное обеспечение контролирует аналоговые (вакуум, температура, давление) и дискретные (состояние вентилях, клапанов) параметры комплекса. Контролируемые аналоговые параметры отображаются в текстовой и графической форме в режиме реального времени. Графические окна для отображения аналоговых данных обладают широкими возможностями 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 осуществляется через активные графические мнемосхемы.

Прочностная отработка ЖТМ

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 не менее 100 ч в диапазоне температур от 20 до 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 составляет не менее 15 МПа.

Первоначально ампулу проверяли на герметичность на гелиевом течеискателе ТИ1-14М методом обдува гелием при установленной чувствительности прибора не менее $1 \cdot 10^{-9}$ м³·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 минут все макеты прошли без разрушения и потери герметичности; падения давления в процессе выдержки не наблюдалось.

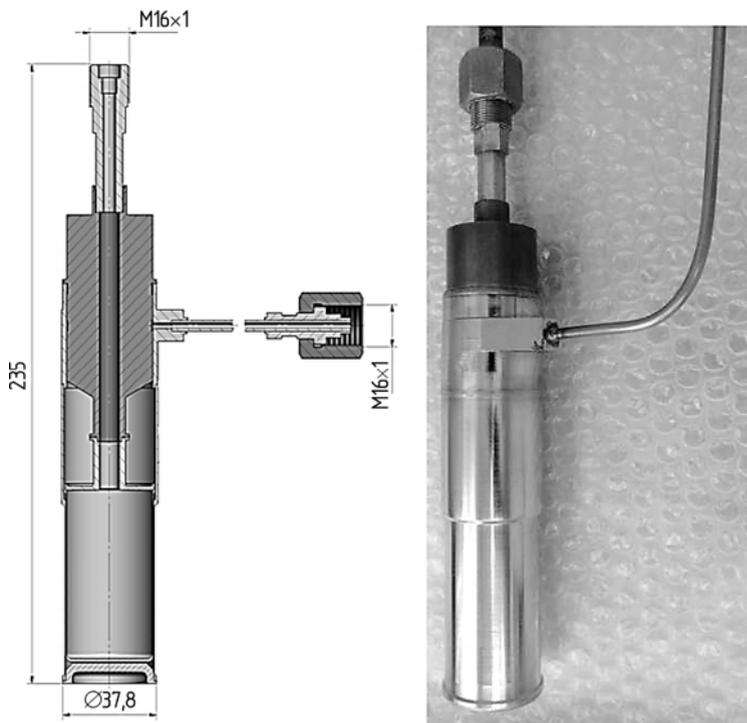


Рис. 3. Макет ампулы

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



Рис. 4. Макет № 1 после испытаний на несущую способность

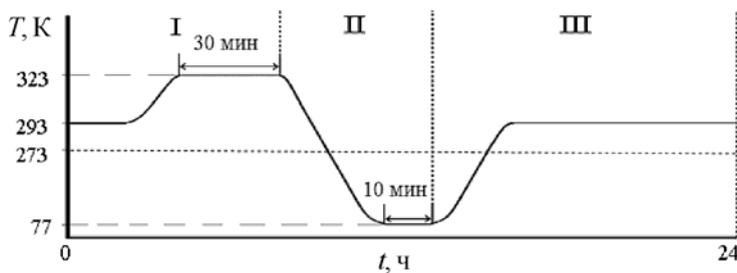


Рис. 5. Температура макета при термоциклировании

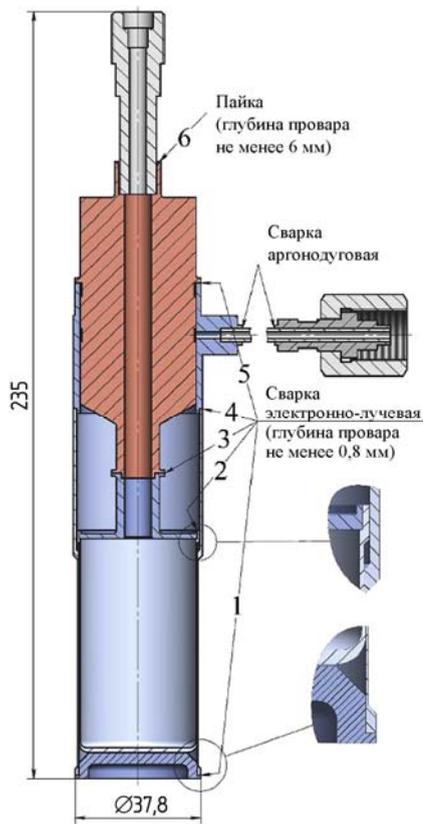


Рис. 6. Сварные и паяные соединения макета ампулы

Кроме того, после испытаний на несущую способность макета № 1 все его сварные и паяные соединения (рис. 6) подвергали металлографическому исследованию с целью определения фактических размеров соединений.

Результаты металлографических исследований показали следующее:

- разрушений сварных и паяного соединений в результате испытаний макета № 1 на несущую способность не произошло;
- все сварные соединения удовлетворяют предъявленным требованиям: глубина провара $\geq 0,8$ мм, глубина пайки ≥ 6 мм. Типичная микроструктура сварных и паяного соединений показана на рис. 7.

Грубые дефекты сварных и паяного соединений типа трещин и непроваров, которые могут оказать влияния на прочность сварного шва, не обнаружены. В некоторых сварных швах выявлены допустимые дефекты в виде отдельных пор.

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

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 °С) и выдержка при этой температуре 30 минут (участок I на рис. 5);
- охлаждение макета путем его погружения в жидкий азот с выдержкой при температуре жидкого азота в течение 10 минут (участок II на рис. 5);
- отепление макета на воздухе до комнатной температуры (участок III на рис. 5);
- через 24 ч с момента начала нагрева мишени до температуры 323 К цикл повторялся.

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

После завершения термоциклирования макеты № 2 и № 3 подвергались проверке на герметичность на гелиевом течеискателе, а также проверке на прочность и герметичность давлением водорода 2,5 МПа с выдержкой в течение 10 минут. Макеты успешно выдержали испытания. После этого 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.

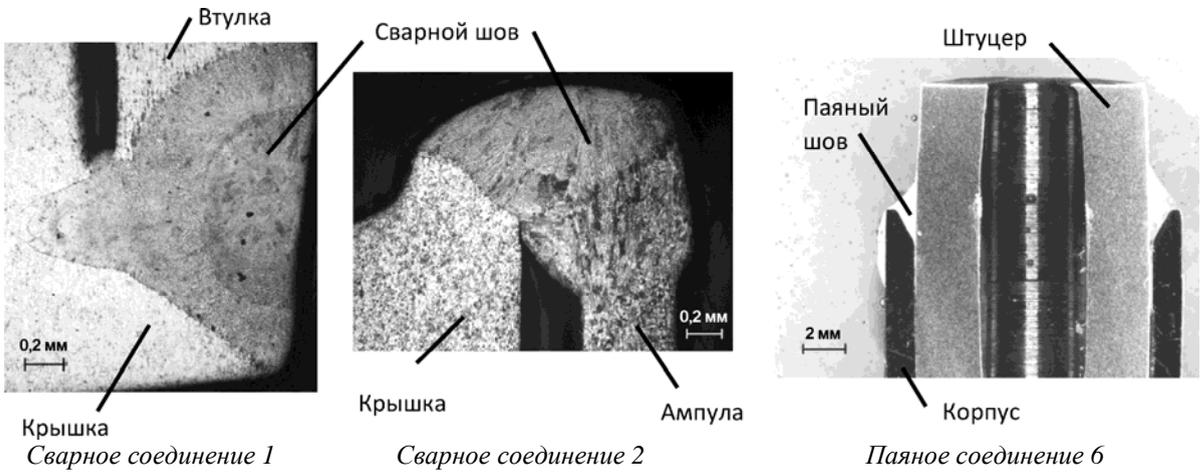


Рис. 7. Типичная микроструктура сварных и паяного соединений макета № 1

Функционирование ЖТМ

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

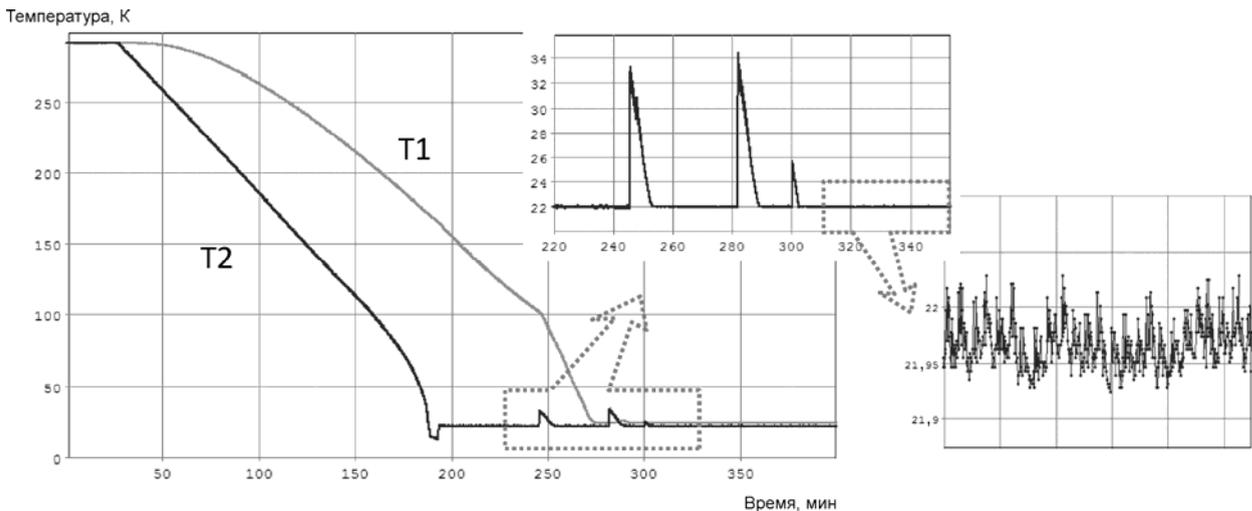


Рис. 8. График типичного изменения температуры мишени при захлаживании, заполнении Н/Т-смесью и дальнейшей выдержке при заданной температуре

Графики Т1 и Т2 на рис. 8 соответствуют показаниям термодиодов, располагающихся на доньшке второго рубежа защиты мишени (Т1) и в области контакта мишени с криоголовкой (Т2).

Из графиков видно, что 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 электронагреватели, управляемые АСКУ установки «Тритон». Стабилизации температуры мишени по термодиоду T2 в течение всего сеанса осуществлялась с точностью $\pm 0,03$ К. Незначительные скачки температуры мишени по термодиоду T2 (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 T2) в течение всего сеанса колебания температуры не превышали $\pm 0,05$ К.

При стабилизации температуры мишени при значении 22 К по термодиоду T2 температура по термодиоду T1 стабилизировалась при значении ~30 К. Различие по температуре связано с тем, что между доньшком второго рубежа защиты мишени, на котором установлен термодиод T2, и доньшком самой мишени имелся зазор, который находился под вакуумом ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па).

Заполнение мишени Н/Т-смесью проводили в несколько этапов, предварительно запасая смесь в емкости известного объема (CV1 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 производилась экспозиция мишени под мюонным пучком и дальнейшая регистрация физических параметров эксперимента.

Жидкотритиевая мишень использовалась в двух сеансах 2016 г., которые различались концентрацией трития в Н/Т-смеси, заполняющей мишень. Содержание трития в смеси, давление газа над смесью и длительность сеансов приведены в таблице.

Сеанс	Содержание трития, %	Давление, кПа	Длительность сеанса, ч
1	$0,84 \pm 0,01$	155–156	>90
2	$0,1 \pm 0,01$	152–154	>180

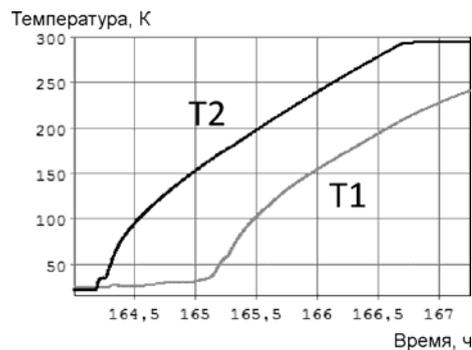


Рис. 9. График изменения температуры при отеплении мишени

Увеличенная длительность второго сеанса была вызвана необходимостью проведения дополнительной экспозиции с измененным местоположением регистрирующей аппаратуры для фиксации угловой корреляции гамма-квантов.

По завершении сеанса и набора необходимой статистики проводилась процедура отепления мишени и поглощения смеси ИВ на ловушку BS5 (см. рис. 2) КПГС. Для сокращения длительности процесса отепления были задействованы электронагреватели, находящиеся на мишени. Время отепления мишени до комнатной температуры составило менее 3 ч (рис. 9).

Заключение

Для исследований ртц-синтеза РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ОИЯИ создали жидкотритиевую мишень со следующими рабочими параметрами:

- количество ИВ в мишени ~40 л (н.у.);
- точность поддержания температуры во времени – не хуже $\pm 0,05$ К;
- максимальное давление в объеме мишени – не более 4 МПа;
- время захолаживания 2,5 ч, отепления – 3 ч.

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

С использованием ЖТМ в 2016 г. на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведены 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 ртц-синтеза с выходом одиночных гамма-квантов и мюонов конверсии, а также впервые обнаружен канал с выходом электрон-позитронных пар и получено указание на существование нового канала с выходом пары гамма-квантов ($ptc \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma + \gamma + 19,82 \text{ МэВ}$). Предварительные результаты подтверждают теоретические предсказания Я. Б. Зельдовича и С. С. Герштейна о продуктах выхода в ядерных реакциях в холодном водороде с участием мюонов.

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

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

Список литературы

1. Argo H. V., Gittings H. T., Hemmendinger A. et al. Properties of the $T^3(p,\gamma)He^4$ reaction // Phys. Rev. 1950. Vol. 78, Issue 6. P. 691–694.
2. Taschek R. F., Jarvis G. A., Hemmendinger A. et al. A study of the interaction of protons with tritium // Phys. Rev. 1949. Vol. 75, Issue 9. P. 1361–1365.
3. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. Ядерные реакции в холодном водороде // УФН. 1960. Т. LXXI. Вып. 4. С. 581–630.
4. Baumann P., Daniel H., Grunewald S. et al. Muon-catalyzed pt-fusion // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 70. P. 3720.
5. Юхимчук А. А., Апасов В. А., Виноградов Ю. И. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 1999. № 6. С. 17–23.
6. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Ганчук Н. С. и др. Тритиевая мишень высокого давления // ПТЭ. 1999. № 1. С. 28–33.

7. Перевозчиков В. В., Юхимчук А. А., Виноградов Ю. И. и др. Дейтериевая мишень высокого давления // ПТЭ. 2002. № 4. С. 155–160.
8. Yukhimchuk A. A., Tumkin D. P., Boitsov I. Ye. et al. Cryogenic tritium target // Fusion Sci. and Tech. 2005. Vol. 48. P. 294–297.
9. Perevozchikov V. V., Yukhimchuk A. A., Vinogradov Yu. I. et al. High-pressure tritium targets for research in muon-catalyzed fusion // Ibid. P. 310–313.
10. Vom V. R., Демин А. М., Демин Д. Л. и др. Экспериментальное исследование реакции dt-синтеза в широком диапазоне условий D/T смеси // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. Вып. 4. С. 752–779.
11. Bogdanova L. N., Demin D. L., Duginov V. N. et al. Experimental study of nuclear fusion reactions in a μ -system // Physics of Particles and Nuclei Lett. 2012. Vol. 9, N 8. P. 605.
12. Виноградов Ю. И., Арюткин В. С., Курякин В. А. и др. Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 2004. № 3. С. 29–41.
13. Вихлянцев О. П., Виноградов Ю. И., Курякин А. В. и др. Распределенная автоматизированная система для радиометрического контроля объемной активности газозвушных смесей // Сб. докл. Восьмой международной школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова (HISM'12 Junior). – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 260–270.
14. Св-во РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ) / А. В. Курякин, Ю. И. Виноградов [Электронный ресурс]. – <http://www.crw-daq.ru>.

A Cryogenic Liquid Tritium Target for $pt\mu$ -Synthesis

A. A. Yukhimchuk, I. P. Maksimkin, R. K. Mysyaev, I. L. Malkov, V. V. Baluev,
S. V. Fil'chagin, O. P. Vikhlyantsev, A. V. Kuryakin, A. D. Tumkin,
A. I. Gurkin, A. V. Buchirin

RFNC-VNIIEF has developed a cryogenic liquid tritium target for $pt\mu$ -synthesis research, which in 2016 on the muon channel of the JINR Phasotron has worked more than 270 hours, confirming compliance with the requirements and the correctness of the proposed technical solutions. The target at a maximum working pressure of up to 4 MPa with the volume of the irradiated ampoule up to 80 cm³ and three boundaries of protection allows to liquefy up to 40 liters of a mixture of hydrogen isotopes and maintain a temperature in the range of 20–22 K with an accuracy of not worse than ± 0.05 K. Based on the results of $pt\mu$ -synthesis experiments the channel of reactions with the release of electron-positron pairs was first detected, and an indication of the existence of a new channel of reactions with a pair of γ -quanta was obtained.