

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.664:546.11.027*3

ПАРАМЕТРЫ КРИОГЕННЫХ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР НА УСТАНОВКЕ
АКУЛИНА-2

© 2026 г. Ал. А. Юхимчук^{а, *}, А. А. Безбах^б, А. В. Горшков^б, Н. Ю. Дьянов^а,
А. А. Кирдяшкин^а, С. А. Крупко^б, И. П. Максимкин^а, И. Л. Малков^а,
Р. К. Мусяев^{а, **}, А. С. Фомичев^б, Ар. А. Юхимчук^а

^аРоссийский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики

Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*E-mail: aay1905@mail.ru

**E-mail: rmusyaev@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.04.2026

После доработки 16.07.2026

Принята к публикации 11.08.2026

Приведены параметры криогенных тритиевых мишеней, предназначенных для проведения экспериментов с радиоактивными пучками на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 по изучению свойств нейтронно-избыточных ядер в диапазоне $Z \leq 16$. Особое внимание при создании тритиевых мишеней уделялось обеспечению норм радиационной безопасности при работе с тритием, что и предопределило основные конструктивные решения, степень проработки на стадии НИОКР и требования к эксплуатации мишеней. В работе приведены конструктивные решения, технология изготовления, объем и результаты функциональных и ресурсных испытаний мишеней на стадии отработки.

Ключевые слова: тритий, криогенная тритиевая мишень, нейтронно-избыточные ядра, границы ядерной стабильности, фрагмент-сепаратор

1. ВВЕДЕНИЕ

Продвижение к границам нейтронной стабильности с целью изучения свойств экзотических нейтронно-избыточных ядер было и остается основным приоритетом ядерной физики на протяжении последнего полувека. Использование криогенных мишеней изотопов гелия и водорода (особенно трития) в широком диапазоне толщины (от 10^{19} до 10^{22} атом/см²) дает уникальную возможность для проведения таких исследований.

В начале 2000-х годов для проведения исследований нейтронно-избыточных ядер на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-1 при ускорителе тяжелых ионов У-400М по инициативе Ю.Ц. Оганесяна была реализована возможность проведения работ с тритиевым пучком и тритиевыми мишенями [1–

8]. В период с 2001 по 2011 гг. с использованием трития была проведена серия экспериментов по изучению свойств тяжелых изотопов водорода ^4H , ^5H и гелия ^8He , ^{10}He . Результаты детально описаны в работах [9–11], а также в обзоре [12] и ссылках к ним. Основными недостатками работ тех лет являлись невысокая интенсивность вторичных пучков на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-1 и ограничение по количеству трития в ловушке не более 1000 Ки, что не всегда позволяло полностью заполнить мишень жидким тритием. Оба этих обстоятельства приводили к невысокой статистике событий и ряду неопределенностей в геометрии тритиевой мишени.

С 2018 года на новом фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 [13, 14] стали возможны эксперименты с высококачественными радиоактивными пучками ($E \sim 5\text{--}50$ МэВ/нуклон, $Z \leq 16$) и криогенными мишенями изотопов водорода и гелия [15]. На установке были получены результаты мирового уровня для целого ряда нейтронно-избыточных систем $4n$, $^6,^7\text{H}$, ^7He [16–19]. В 2026 году ожидается запуск новой тритиевой инфраструктуры [20, 21], что существенно расширит экспериментальные возможности комплекса фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 и ускорителя тяжелых ионов У-400М. В частности, из серии уникальных экспериментов с использованием тритиевой мишени (газ или жидкость) и радиоактивных пучков $^6,^8\text{He}$, $^9,^{11}\text{Li}$, $^{10,12,14}\text{Be}$ и др. в первую очередь следует выделить проведение ядерных реакций $(t,p) - ^3\text{H}(^8\text{He}, ^1\text{H})^{10}\text{He}$, $^3\text{H}(^{11}\text{Li}, ^1\text{H})^{13}\text{Li}$ и $^3\text{H}(^{14}\text{Be}, ^1\text{H})^{16}\text{Be}$, а также $(t,p\alpha) - ^3\text{H}(^{14}\text{Be}, ^5\text{Li})^{12}\text{He}$, ведущих к изучению экзотических систем ^{10}He , ^{12}He , ^{13}Li и ^{16}Be [22].

Для проведения работ с тритием на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 создана тритиевая инфраструктура, которая позволяет проводить работы с количеством трития до 2.7 кКи и обеспечивать толщину мишени примерно от 10^{20} до $7 \cdot 10^{21}$ атом/см² при диаметре ячейки 25 мм (ранее толщина не превышала $2 \cdot 10^{21}$ атом/см² при диаметре ячейки 10 мм) [22]. Эта уникальная возможность (сегодня единственная в мире) откроет широкий класс исследований экзотических ядер, находящихся вблизи границ ядерной стабильности. Основными элементами тритиевой инфраструктуры, ради которых она и создавалась, являются тритиевые мишени. В настоящей работе приведены конструктивные особенности мишеней, технология изготовления мишеней, объем и результаты функциональных и ресурсных испытаний мишеней на стадии отработки.

2. КРИОГЕННАЯ ТРИТИЕВАЯ МИШЕНЬ

Криогенные тритиевые мишени (КТМ) для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер, образующихся в ядерных реакциях (t,p) , (t,d) , (t,α) , $(t,p\alpha)$ с радиоактивными пучками, разрабатываются и изготавливаются в РФЯЦ–ВНИИЭФ с 2000 года [5, 6]. За это время принципиальная схема построения тритиевых мишеней не изменилась, была лишь усовершенствована их конструкция, повышена технологичность изготовления [23], а также за счет обеспечения начального натяжения фольги [24] устранена неопределенность в геометрических размерах и величине вместимости рабочего объема мишени. Кроме того, предложен и экспериментально отработан способ контроля в режиме реального времени степени заполнения КТМ

путем измерения скорости изменения давления газа в калиброванной емкости, соединенной с мишенью [25]. При этом полное заполнение тритием мишени, находящейся в вертикальном положении, сопровождается резким увеличением давления, связанным с появлением капиллярного эффекта, когда уровень жидкости достигает основания капилляра, установленного сверху корпуса мишени.

Принципиальная схема КТМ и общий вид конструкции мишени изображены на рис. 1. Мишень представляет собой цилиндрическую полость А, образуемую поверхностью корпуса К и двумя мембранами М1. С целью исключения возможного проникновения трития во внешнюю среду или во внутреннюю полость реакционной камеры в случае нештатных ситуаций в устройстве мишени предусмотрен дополнительный рубеж защиты. Он состоит из двух полостей Б, образуемых корпусом К и мембранами М1 и М2, трубкой Т2 и устройством поглощения трития – титановым геттером ГТ. Внешние газовые коммуникации имеют коаксиальную конструкцию. Внутренняя трубка Т1 соединяет рабочий объем мишени с калиброванным объемом системы наполнения, а внешняя Т2 соединяет дополнительный рубеж защиты с геттером ГТ. Геттер располагается вне зоны охлаждения мишени и заполнен прессованным порошкообразным титаном (Ti), активированным по специальной технологии. Равновесное давление трития над активированным титаном при комнатной температуре не превышает 10^{-6} Па [26, 27]. Данное техническое решение позволяет предотвратить попадание трития в окружающую среду в случае нарушения герметичности мембран М1. Количество сорбента в геттере выбрано из условия возможности обеспечения полного поглощения трития, используемого в эксперименте. Мишень имеет четыре варианта исполнения. В первом варианте тритий в полости А находится в жидкой фазе (криогенная жидкая тритиевая мишень КЖТМ), в остальных трех – в газовой фазе (криогенная газовая тритиевая мишень КГТМ). Конструкции мишеней различаются незначительно. Основное различие заключается лишь в расстоянии между мембранами М1 (для КЖТМ – $d_0=0.4$ мм; для КГТМ – $d_0=3, 5$ и 7 мм соответственно). Все детали корпуса, за исключением мембран, выполнены из стали 12Х18Н10Т. Мембраны изготовлены из фольги нержавеющей стали SS 301НТ толщиной 8 мкм.

Рис.1.

Рис.2.

Для корректной обработки информации необходимо измерять фактическую толщину и форму криогенной мишени *in situ* в ходе сеанса (мишень при заполнении газом приобретает линзообразную форму). Эти требования обусловлены необходимостью точнее знать длину пути прохождения радиоактивных ионов через тритиевую среду с учетом деформации фронтальных стенок мишени из металлической мембраны, которая возникает при избыточном давлении среды относительно условий в полостях Б. Такая неоднородность геометрии мишени дает определенные искажения в интегральный сигнал на расположенных рядом детекторах частиц, которые следует обязательно учитывать. На рис. 2 показано, как изменяются форма и толщина тритиевой мишени при изменении давления

водорода внутри мишени. Толщина ($d_{\max}$) мишени и радиус кривизны (R) мембраны рассчитываются по формулам

$$h_{\max} = 0.662 a \sqrt[3]{\frac{P a}{l E}}, \quad (1)$$

$$d_{\max} = d_0 + 2h_{\max}, \quad (2)$$

$$R = \frac{a^2 + h_{\max}^2}{2 h_{\max}}. \quad (3)$$

Здесь $h_{\max}$ – максимальное растяжение мембраны (стрела прогиба), E – модуль упругости материала мембраны, l – толщина мембраны, a – радиус мембраны, d_0 – номинальная толщина между мембранами, P – давление водорода в мишени.

Из графика следует, что толщина мишени в центре при использовании мембраны толщиной 8 мкм увеличивается в несколько раз в зависимости от номинальной толщины между внутренними мембранами. Используя известные данные о плотности трития для газа и жидкости при криогенных температурах T_m , можно оценить толщину мишени в единицах атом/см², как показано в табл. 1.

Таблица 1. Оценки толщин тритиевой мишени

Толщина мишени	КЖТМ (0.38 бар, $T_m=22$ К)	КТМ (0.8–0.95 бар, $T_m=26$ К)		
	$d_0=0.4$ мм	$d_0=3$ мм	$d_0=5$ мм	$d_0=7$ мм
$d_{\max}$, мм	1.49	4.4–4.49	6.4–6.49	8.4–8.49
$d_{\max}$, атом/см ²	$\sim 8.0 \cdot 10^{21}$	$(2-2.4) \cdot 10^{20}$	$(2.9-3.5) \cdot 10^{20}$	$(3.8-4.6) \cdot 10^{20}$

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ

В каждой мишени содержится не менее 14 сварных соединений, выполняемых импульсной лазерной сваркой, а всего работа по изготовлению мишени включает 28 стадий (сборка со сгибанием элементов конструкции и операции сварки с проверкой герметичности). Данная работа требует высокой точности изготовления и тщательной подготовки деталей перед сваркой. Сварка выполнялась на лазерных установках в ручном и автоматическом режимах. Ручной режим применялся в основном для сварки капилляров и тонкостенных трубок с корпусом мишени, штуцером и геттером. После каждой операции сварки проводился контроль герметичности элементов мишени гелиевым течеискателем с чувствительностью не хуже $1 \cdot 10^{-10}$ м³·Па/с.

Отработка технологии лазерной сварки мишеней проводилась на каждой стадии. Наиболее трудоемкими и проблемными были стадии приварки тонких (толщиной 8 мкм) мембран к корпусам и кольцам. Это связано с тем, что при такой толщине в значительной мере оказывают влияние следующие факторы:

– качество используемого металла (наличие вкрапления в виде примесей оказывает негативное влияние на качество сварки);

- качество обработки поверхности (например, шероховатость и риски);
- оправка для сварки (должна обеспечивать минимальный зазор между мембраной, корпусом и кольцом);
- подготовка деталей перед сваркой (необходимо тщательно очистить их от масляных загрязнений, пыли и микрочастиц).

Для адаптации режима сварки была проведена отработка сварки элементов мишени (мембрана толщиной 8 мкм, корпус и кольцо). Посредством визуального осмотра полученных сварных швов был выбран режим с меньшим диаметром сфокусированного пятна лазера (определяется лимбом) и напряжением на накопителе, что обеспечивало наименьшие тепловложения и термические деформации в процессе сварки. После контроля на герметичность были проведены металлографические исследования.

4. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки качества приварки мембран М1 и М2 были проведены металлографические исследования сварных соединений образцов мишеней, выполненные при отработке технологии лазерной сварки. Расположение и схема сварного соединения образца мишени приведены на рис. 3. Исследование каждого сварного соединения проводилось в двух продольных сечениях, расположенных под углом примерно 90°. Для удобства приготовления шлифов образцы сварных соединений, вырезанные из мишенной ячейки, в специальных формах заливались эпоксидным компаундом.

Полученные шлифы сначала обрабатывались на шлифовальных бумагах Р120 и Р240, затем полировались с помощью алмазных паст с размерами зерен 9 и 3 мкм и окончательно доводились с применением водной суспензии оксида алюминия (размер частиц 0.04 мкм). Для выявления структуры материала сварных соединений шлифы травились в кипящем реактиве Круппа (50 мл воды, 50 мл соляной кислоты, 5 мл азотной кислоты). Структура материала изучалась и фотографировалась на металлографическом микроскопе при оптических увеличениях до 500 раз.

Результаты (рис. 4) металлографических исследований сварных соединений образцов мишени показали, что дефекты сварных соединений типа трещин, пор, непроваров и т.п. не обнаружены.

Лазерная сварка должна обеспечивать герметичность мишеней, и в то же время необходимо минимизировать разогрев материала мембраны в зоне сварного соединения, чтобы избежать чрезмерного снижения прочностных свойств материала мембраны. В связи с этим оптимальная глубина провара h , при которой оплавление металла в зоне сварного шва минимальное, находится в диапазоне от 0.2 до 0.4 мм.

Помимо параметров лазерной сварки на герметичность сварных соединений определенное влияние оказывает качество материалов (сталь типа 12Х18Н10Т) свариваемых деталей, особенно материала корпуса, так как в зоне свариваемых кромок толщина металла составляет примерно 0.2 мм.

Рис.3.

Рис.4.

5. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ КРИОГЕННЫХ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ И МИШЕННЫХ БЛОКОВ

Для определения ресурсных характеристик семейства тритиевых мишеней в РФЯЦ–ВНИИЭФ были изготовлены жидкотритиевые (КЖТМ) и газовые (КТМ) криогенные мишени. Для имитации условий штатной работы мишеней на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 испытания проводились в составе блока мишенного (БМ), смонтированного на вакуумной камере (ВК) – аналоге реакционной камеры – с использованием нерадиоактивных изотопов водорода. Мишенный блок конструктивно состоит из системы наполнения, в состав которой входят тритиевый источник BS1, буферные емкости CV1 и CV2, мишенная сборка с КТМ и двухступенчатая головка криорефрижератора с омическим нагревателем для стабилизации температуры мишени [22]. Принципиальная газовакуумная схема БМ показана на рис. 5.

Рис.5.

Вакуумирование внутренней полости мишени, газовых коммуникаций и системы наполнения осуществляется до остаточного давления не более 10^{-3} Па. Вакуумирование защитного кожуха, являющегося вторым рубежом защиты системы наполнения мишени, осуществляется до остаточного давления не более 1 Па.

Заполнение мишени изотопами водорода осуществляется следующим образом. Источник BS1 соединяется с предварительно вакуумированными емкостями CV1 и CV2 и мишенью (рис. 5) и нагревается до температуры, обеспечивающей необходимое давление заданного изотопа водорода. Зависимости равновесного давления изотопов водорода над гидридом урана от температуры имеют вид: $\lg P[\text{Па}] = -4590/T + 11.59$, $\lg P[\text{Па}] = -4500/T + 11.56$ и $\lg P[\text{Па}] = -4471/T + 11.73$ соответственно для протия, дейтерия и трития [28]. Из этих данных следует, что для заполнения мишени газом до давления 0.1 МПа достаточен нагрев источников до температуры (680–705) К.

После завершения процесса заполнения калиброванных емкостей CV1 (CV2) отключается нагрев источника BS1. При охлаждении источника происходит обратное поглощение выделенного газа. Это позволяет, с одной стороны, многократно использовать один и тот же газ, а с другой, что является более существенным, максимально уменьшить количество трития, уходящего в систему утилизации в ходе штатного сеанса.

Для достижения высокой точности регистрации спектров заряженных частиц – продуктов ядерных реакций, например протона в случае (t, p) , – необходимо с высокой точностью знать значение угла между направлением движения бомбардирующего ядра и родившейся заряженной частицы. Это обстоятельство требует создания как можно более тонких мишеней с высокой плотностью и равномерностью распределения ядер по объему мишени. Для реализации этих

требований мишени охлаждаются до криогенных рабочих температур. Рабочая температура мишеней зависит от давления и используемого изотопа водорода и соответствует следующим диапазонам: для КЖТМ – (18–21) К, для КГТМ – (23–30) К.

Процесс охлаждения (сжижения) газа в мишени происходит в следующей последовательности. Внутренняя полость ВК вакуумируется до давления 10^{-3} Па. Система наполнения, предварительно заполненная рабочим газом, через газовую магистраль соединяется с внутренним объемом мишени. Затем включается криорефрижератор и начинается процесс охлаждения. Динамика процесса охлаждения контролируется по показаниям термодиодов ТД1 и ТД2, закрепленных на корпусах ложементов мишени (рис. 6). При определении температуры газа во внутренней полости мишени принято допущение, что при установившемся статическом режиме температура газа с большой точностью равняется температуре корпуса ложементов. После достижения требуемой температуры газа в мишени система охлаждения переводится в режим термостабилизации, обеспечиваемый регулированием электрических параметров нагревателя с помощью термоконтролера. После завершения сеанса отключается охлаждение мишени, мишень отепляется (здесь и далее отепление – процесс естественного или контролируемого нагрева мишени от криогенной до комнатной температуры) и газ удаляется в систему наполнения, а затем поглощается генератором трития BS1.

6. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МИШЕНИ В СОСТАВЕ МИШЕННОГО БЛОКА

Функциональные испытания мишени в составе мишенного блока выполнялись с КТМ (КГТМ) на стенде (рис. 7). После сборки системы наполнения БМ с мишенью и установки на ВК проводилась проверка на герметичность мест стыковки гелиевым течеискателем. Функциональные испытания мишени начинались с вакуумирования ее внутренней полости, газовых коммуникаций, системы наполнения и ВК до остаточного давления не более 10^{-3} Па. Заполнение мишени изотопами водорода проводилось в несколько этапов. Изотоп водорода (H_2 или D_2) предварительно выделялся из источника и запасался в емкости известного объема, затем он перепускался в полость мишени. После установления в мишени необходимого давления проводилась процедура охлаждения мишени с помощью гелиевого криорефрижератора до рабочей температуры 29 К. После достижения требуемой температуры мишени система охлаждения переходила в режим термостабилизации с поддержанием стабильности заданной температуры с точностью ± 0.002 К (см. рис. 8).

Зависимости изменения температуры от времени, представленные на рис. 9, соответствуют показаниям термодиодов ТД1 и ТД2.

Из графика следует, что время, необходимое для охлаждения мишени от комнатной температуры до температуры 29 К и стабилизации при этом значении, составило примерно 2 ч. При стабилизации температуры мишени при значении 29 К по термодиоду ТД1 значение температуры по ТД2 составляло примерно 29.4 К. Различие в показаниях термодиодов связано с их нахождением на

разных ложементов мишени и недостаточным обеспечением должного термоконтакта через индиевую прокладку между ними. Для построения графиков использовались показания термодиода ТД1. По завершении пятичасовой выдержки проводилась процедура отепления мишени. Время отепления мишени до комнатной температуры составляло примерно 33 ч.

Рис. 6.	Рис. 7.
Рис. 8.	Рис. 9.

7. ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

В ходе сеанса по измерению физических процессов, протекающих в КТМ в процессе ее экспозиции на радиоактивном пучке фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2, планируется однократное использование КТМ. Однако в процессе сеанса возможно возникновение различных непредвиденных обстоятельств, например, длительное выключение ускорителя, замена детекторов и др. Это может привести к необходимости проведения отепления КТМ на неопределенный срок. Таким образом, возникает необходимость определения работоспособности КТМ в условиях многократного изменения температуры в циклах “охлаждение – выдержка при рабочей температуре – отепление”.

Для определения ресурса КЖТМ в ходе проведения термоциклических испытаний было проведено 11 циклов охлаждения, выдержки мишени в течение 5 ч при температуре 15 К и последующего отепления до комнатной температуры. Также проводилось однократное охлаждение со скоростью 0.005 К/мин до 15 К со временем выдержки до 100 ч и отеплением до комнатной температуры. Условия проведения ресурсных испытаний КЖТМ приведены в табл. 2. Зависимости изменения давления водорода (протия) в КЖТМ от температуры приведены на рис. 10.

Для определения ресурса КГТМ было проведено 10 циклов охлаждения и выдержки мишени в течение 5 ч при температуре 29 К с последующим отеплением до комнатной температуры. Кроме того, проведены однократное охлаждение до температуры 29 К со временем выдержки 100 ч и однократное охлаждение до 15 К со временем выдержки 3 ч, а также испытания с разными исходными давлениями протия и дейтерия при охлаждении от 30 К до 15 К и серия испытаний с разными скоростями охлаждения и отепления. Условия проведения ресурсных испытаний КГТМ приведены в табл. 3. Зависимости изменения давления водорода (протия и дейтерия) в КГТМ от температуры приведены на рис. 11, где показано, как меняются измеряемые параметры в зависимости от скорости охлаждения и отепления.

8. ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Целью данных испытаний является получение значения несущей способности мишени, прошедшей полный цикл термоциклических испытаний, т.е. мишени, разрушенной внутренним давлением водорода, причем скорость нагружения должна была имитировать скорость повышения давления в процессе отепления.

Для определения прочностных характеристик мишеней испытаниям подвергалась одна КТМ без внутреннего наполнения (отсутствуют мембраны М1) и без геттера, четыре КТМ без геттера и одна КТМ с откаченным вторым рубежом защиты (имитация геттера).

Испытания проводились на специальном стенде (см. рис. 12) с использованием устройства нагружения на исходных КТМ (предварительно не подвергавшихся испытаниям) с давлением воздуха в нормальных температурных условиях.

Таблица 2. Условия проведения ресурсных испытаний КЖТМ

№	Газ в мишени	Начальное давление водорода в мишени при комнатной температуре, МПа	Начальная температура, К	Конечная температура, К	Скорость охлаждения, К/мин	Время выдержки при конечной температуре, ч	Скорость нагрева, К/мин	Кол-во циклов
1	H ₂	0.9	комн.	15	—	5	—	11
2	H ₂	0.9	комн.	15	0.005	100	0.005	1

Рис.10

Таблица 3. Условия проведения ресурсных испытаний КГТМ

№	Газ в мишени	Начальное давление водорода в мишени при комнатной температуре, бар	Начальная температура, К	Конечная температура, К	Скорость охлаждения, К/мин	Время выдержки при конечной температуре, ч	Скорость нагрева, К/мин	Кол-во циклов
1–2	H ₂	0.9	комн.	29	—	5/100	—	10/1
3	H ₂	0.9	комн.	15	—	3	0.3	1
4–6	H ₂	0.9/0.6/0.3	30	15	—	0.1	0.3	3
7–9	D ₂	0.9/0.6/0.3	30	15	—	0.1	0.3	3
10–15	D ₂	0.9	30	15	0.01/0.05/ 0.1/0.2/0.5/1	0.1	0.01/0.05/ 0.1/0.2/0.5/1	1

Рис. 11.

Рис. 12.

Нагружение мишеней происходило со скоростью не более 1 бар в минуту до полного разрушения мембран мишени, давление разрушения фиксировалось датчиком давления DD. Характерный вид КТМ (по номерам) после прочностных испытаний показан на рис. 13, а вид графиков нагружения показан на рис. 14. Прочностные испытания показали, что разрушение КТМ происходит в результате отрыва мембраны в зоне сварного соединения.

Разрушение мембран мишени по результатам кратковременных испытаний давлением воздуха при нормальных климатических условиях происходило в зоне сварного соединения. Разрушение внешних мембран мишени происходит при нагружении мишени до 2.9 бар (кривая 1 на рис. 14). Разрушение внутренних мембран мишеней фиксировалось в интервале давлений от 5 до 6.5 бар (кри-

вые 2–6 на рис. 14). Разрушение внутренней мембраны в мишени с откаченным межмембранным пространством произошло при давлении 5.5 бар (кривая 6 на рис. 14).

По совокупности испытаний получена выборка из пяти значений давления разрушения $P_{пр}$ внутренней мембраны мишени со следующими параметрами: $\hat{P}_{пр} = 5.98$ бар – среднее предельное давление величины $P_{пр}$, $\sigma_{P_{пр}} = 0.66$ бар – среднеквадратичное отклонение величины $P_{пр}$.

Рис. 13.

Рис. 14.

Принимая нормальный закон распределения предельного давления (давления разрушения) внутренней мембраны мишени, мы получаем следующие оценки: вероятность неразрушения внутренней мембраны мишени при максимальном рабочем давлении $P_{раб}^{max} = 1$ бар составляет не менее 0.999999, нижняя доверительная граница составляет 3.94 бар (при доверительной вероятности 0.999) [29]. На основании этого можно утверждать, что коэффициент запаса прочности по предельной нагрузке внутренней мембраны составляет более 3.5.

9. ДЛИТЕЛЬНОЕ ХРАНЕНИЕ

После изготовления мишеней промежуточное пространство между внешними и внутренними мембранами мишени находится в вакуумированном состоянии и соединено с геттером. В этой ситуации на мембраны действует перепад давления 0.1 МПа. Время хранения от момента изготовления до использования мишени по назначению не определено. В связи с этим потребовалось заложить на опережающее хранение макет мишени, в ходе которого предполагается определить возможность разгерметизации мишени в течение длительного времени хранения.

В связи с этим выбрана следующая процедура проведения работ. Макет КЖТМ (данный тип мишеней был выбран с учетом более жестких условий эксплуатации) с установленным вместо геттера манометром, вакуумированный до остаточного давления 4 Па, заложили (19.03.2022 г.) в предохранительную тару на длительный срок (рис. 15).

Рис. 15.

В случае изменения показаний манометра, но не реже 1 раза в 6 месяцев, проводятся испытания на герметичность мишени. Мишень, заложенная на длительное хранение, сохраняет герметичность спустя 52 месяца хранения. Работы по длительному хранению продолжаются.

10. ВЫВОДЫ

1. Разработана новая конструкция КТМ, обладающая повышенной технологичностью изготовления, в которой, в отличие от предыдущих серий тритиевых мишеней, устранены неопределенности в геометрических размерах и величине вместимости рабочего объема мишени за счет обеспечения начального натяжения фольги.

2. Проведена отработка технологии изготовления мишеней. Выработаны требования к изготовлению деталей мишеней, сварным элементам и оснастке для сварки.

3. Результаты металлографических исследований показали, что в сварных швах дефекты типа трещин, пор, непроваров и т.п. отсутствуют. Оптимальная глубина провара свариваемых кромок корпуса и кольца составляет от 0.2 до 0.4 мм, при этом высота свариваемых кромок корпуса должна быть от 0.75 до 1.0 мм.

4. Для свариваемых деталей мишени (корпус, кольцо), изготовленных из стали 12Х18Н10Т, целесообразно проводить входной контроль металла на наличие строчечных включений и по возможности изготавливать детали таким образом, чтобы направление проката полуфабриката было перпендикулярно продольной оси детали.

5. В ходе ресурсных испытаний КЖТМ выдержала 11 циклов охлаждения до рабочих температур 29 К, сохранив герметичность, и дополнительно 13 циклов охлаждения до температуры 15 К для подтверждения работоспособности КЖТМ при переходе через точку ожижения в случае ошибочных действий оператора.

6. КЖТМ выдержала 12 циклов охлаждения до рабочих температур 15 К, сохранив герметичность.

7. Испытания мишеней избыточным давлением показали, что несущая способность мишеней определяется прочностью внешних мембран и что она более чем в 3.5 раза выше возможных максимальных рабочих давлений, а предварительная оценка прочностной надежности по внутренней мембране мишени составляет 0.999999 при доверительной вероятности 0.999.

8. КЖТМ, заложенная на длительное хранение, сохраняет герметичность спустя 52 месяца хранения. Работы по длительному хранению продолжаются.

9. Мишени удовлетворяют требованиям безопасного проведения длительных экспериментов со вторичными пучками на установке АКУЛИНА-2.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 “Физика изотопов водорода”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu.Ts., Itkis M.G. et al. Nucl. Phys. A. 2004. V. 734. P. 295. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.01.053>
2. Rodin A.M., Stepanov S.V., Bogdanov D.D. et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2003. V. 204. P. 114. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01897-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01897-9)
3. Юхимчук А.А., Ангилонков В.В., Анасов В.А. и др. Система подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М. Сб. докладов Второго международного семинара

- Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'04. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 401.
4. Yukhimchuk A.A., Angilopov V.V., Apasov V.A. *et al.* Fusion Sci. Technol. 2005. V. 48. P. 704. https://doi.org/10.1142/9789812701749_0091
 5. Юхимчук А.А., Перевозчиков В.В., Анасов В.А. и др. ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2002. № 1/2. С.183. <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-FYAR-2002-1-2.pdf>
 6. Yukhimchuk A.A., Perevozchikov V.V., Apasov V.A. *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 513. P. 439. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.06.002>
 7. Юхимчук А.А., Голубков А.Н., Златоустовский С.В. и др. РФ Патент 2234973С2. 2004. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37942192>
 8. Виноградов Ю.И., Арюткин В.С., Курякин А.В. и др. ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 1/2. С. 197. <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-FYAR-2002-1-2.pdf>
 9. Oganessian Yu.Ts., Ter-Akopian G.M., Bogdanov D.D. *et al.* Nuclear Physics at Border Lines. 2002. P. 372. https://doi.org/10.1142/9789812778321_0062
 10. Golovkov M.S., Oganessian Yu.Ts., Ter-Akopian G.M. *et al.* Super-Heavy hydrogen isotopes studied with 58-Mev triton beam. Coll. of reports of International Symposium on Exotic Nuclei. Lake Baikal. Russia, 2001. P. 334.
 11. Оганесян Ю.Ц., Тер-Акопян Г.М., Богданов Д.Д. и др. Изв. РАН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 5. С. 619.
 12. Григоренко Л.В., Головков М.С., Крупко С.А. и др. УФН. 2016. Т. 186. № 4. С. 337. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0186.201604a.0337>
 13. Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M. Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97. <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>
 14. Krupko S.A., Belogurov S.G., Bezbakh A.A. *et al.* Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. № 4. P. 902. <https://doi.org/10.1134/S1547477124700973>
 15. Krupko S.A., Gorshkov A.V., Bezbakh A.A. *et al.* Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. № 1. P. 60. <https://doi.org/10.1134/S1547477124010084>
 16. Bezbakh A.A., Chudoba V., Gorshkov A.V. *et al.* Phys. Rev. Lett. V. 124. 2020. P. 022502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.022502>
 17. Nikolskii E.Yu., Muzalevskii I.A., Bezbakh A.A. *et al.* Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 064605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.064605>
 18. Bezbakh A.A., Golovkov M.S., Denikin A.S. *et al.* Int. J. Mod. Phys. E. 2024. V.33. P. 2450002. <https://doi.org/10.1142/S0218301324500022>
 19. Muzalevskii I.A., Shulgina N.B., Bezbakh A.A. *et al.* Phys. Rev. C. 2025. V. 111. P. 014612. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.111.014612>

20. Юхимчук А.А., Голубков А.Н., Максимкин И.П. и др. Физмат. 2023. Т. 1. №1. С. 5.
<https://doi.org/10.56304/S2949609823010057>
21. Мусяев Р.К., Максимкин И.П., Балугев В.В. и др. Сб. докладов 8-й Международной конференции и 17-й Международной школы “Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM’24”. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ. 2024. С. 305.
22. Фомичев А.С., Безбах А.А., Горшков А.В. и др. Физмат. 2025. Т. 3. № 1. С. 28.
<https://doi.org/10.56304/s2949609825010033>
23. Кирдяшкин А.А., Першина В.М., Мусяев Р.К., Юхимчук А.А., Дьянов Н.Ю. РФ Патент 2847113, 2025.
24. Малков И.Л., Мусяев Р.К., Кирдяшкин А.А., Юхимчук Ар.А., Юхимчук Ал.А. РФ Патент 2826938, 2024.
25. Мусяев Р.К., Юхимчук А.А., Кирдяшкин А.А. РФ Патент 2837718, 2025.
26. Софьина В.В., Павловская Н.Г. Журнал физической химии. 1960. Т. 34. № 5. С.1104.
27. Водород в металлах 2. Прикладные аспекты. Под ред. Г. Альфельда, И. Фёлькия. Москва: Мир, 1981.
28. Маккей К. Водородные соединения металлов. Москва: Мир, 1968.
29. Билык Н.А. Оценка показателей надежности и безопасности механических конструкций с опасными элементами: монография. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Схематическое изображение (а) и общий вид (б) мишени: К – корпус; М1, М2 – мембраны; Т1, Т2 – трубки; А, Б – полости; ГТ – титановый геттер

Рис. 2. Зависимость формы (а) и толщины (б) КЖТМ от давления водорода внутри мишени: R – радиус кривизны мембраны, $d_{\max}$ – толщина мишени, P – давление в мишени

Рис. 3. Место и схема сварного соединения образца мишени: h – глубина провара, l – ширина сварного шва

Рис. 4. Микроструктура сварного соединения (образец мишени): H – высота свариваемых кромок, h – высота провара, l – ширина сварного шва

Рис. 5. Принципиальная газовакуумная схема БМ: ВП1–ВП5 ручные вентили; CV1, CV2 – емкости объемом 300 см³ и 750 см³; BS1 – генератор трития на ²³⁸U; ГТ1, ГТ2 – титановые геттеры; DD1 – датчик давления; М1 – манометр; Т1, Т2 – термодатчики; КТМ – мишень

Рис. 6. Места установки термодиодов на ложементax

Рис. 7. Отработка режимов стабилизации температуры

Рис. 8. Отработка режимов стабилизации температуры

Рис. 9. График изменения температуры мишени в процессе охлаждения, выдержки и отепления

Рис. 10. Графики изменения давления водорода в КЖТМ в зависимости от температуры: а – охлаждение и выдержка мишени в течение 5 ч при температуре 15 К, б – охлаждение и отепление мишени со скоростью 0.005 К/мин при выдержке 100 ч при температуре 15 К

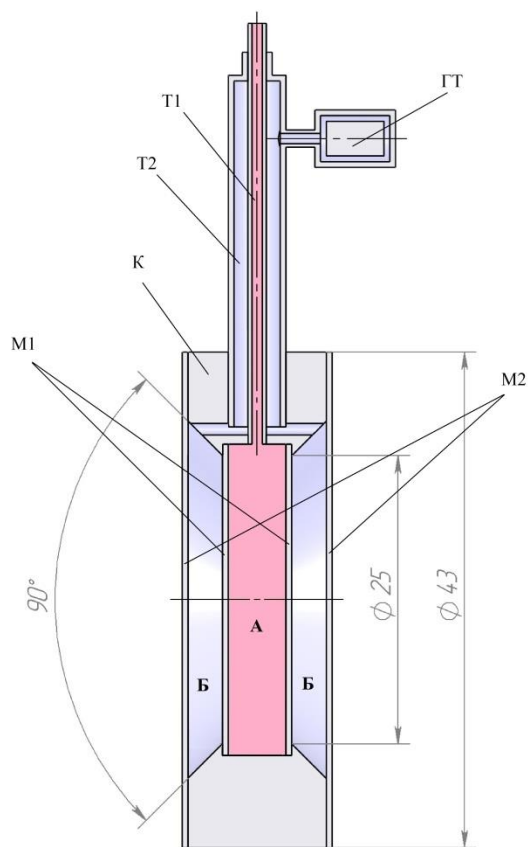
Рис. 11. График изменения давления водорода в КЖТМ в зависимости от температуры: а – охлаждение и выдержка мишени в течение 5 ч при температуре 29 К; б – охлаждение и выдержка мишени с начальными давлениями протия 0.3/0.6/0.9 бар в течение 5 мин при температуре 15 К; в – охлаждение и выдержка мишени с начальными давлениями дейтерия 0.3/0.6/0.9 бар в течение 5 мин при температуре 15 К; г – охлаждение и отепление мишени с разными скоростями охлаждения и нагрева

Рис. 12. Нагруженое устройство (сверху) и схема стенда для прочностных испытаний (снизу): DD – датчик давления, ВП – вентили, КТМ – мишень

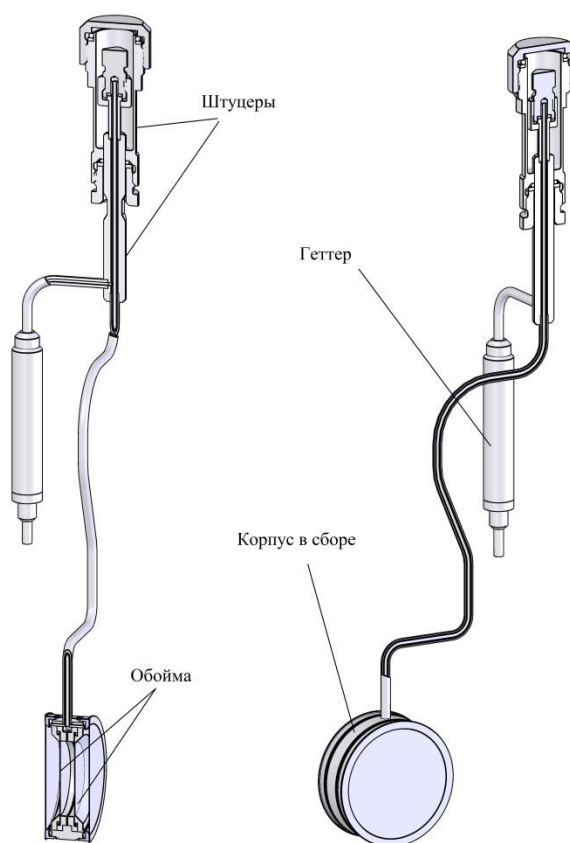
Рис. 13. Характерный вид КТМ после прочностных испытаний

Рис. 14. График нагружения КТМ: 1 – внешняя мембрана КТМ, 2–5 – внутренняя мембрана КТМ, 6 – внутренняя мембрана с откаченным межмембранным пространством

Рис. 15. КЖТМ в предохранительной таре

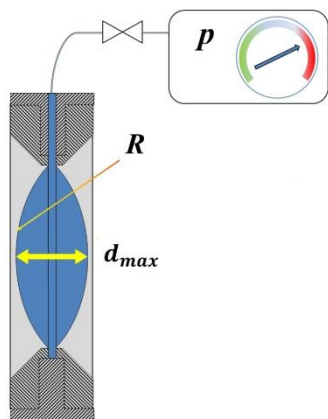


(а)

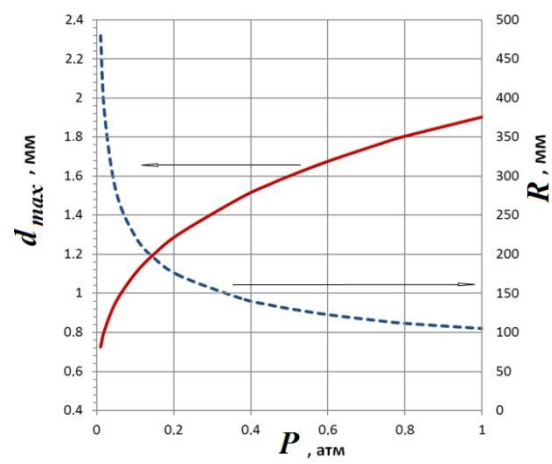


(б)

Рис. 1.



(a)



(б)

Рис. 2.

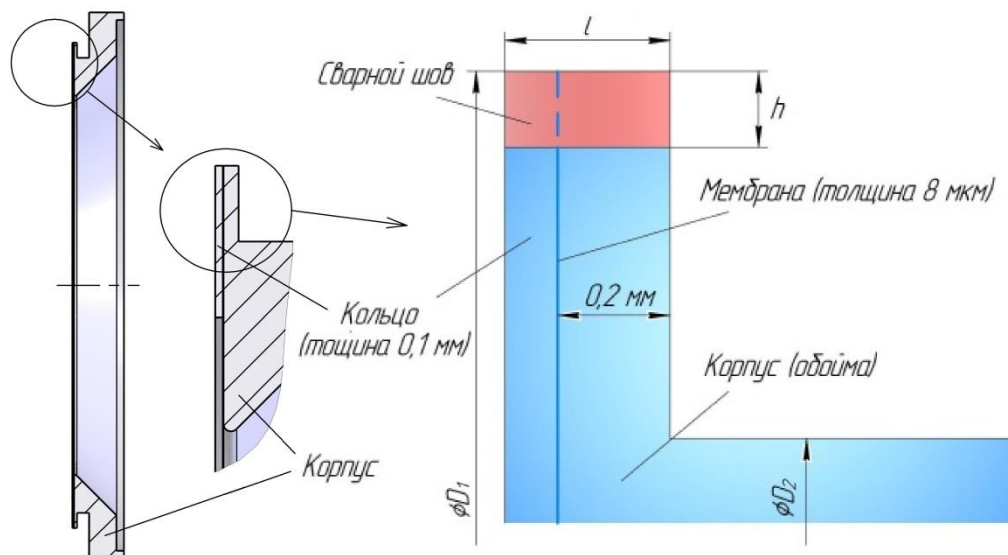


Рис. 3.

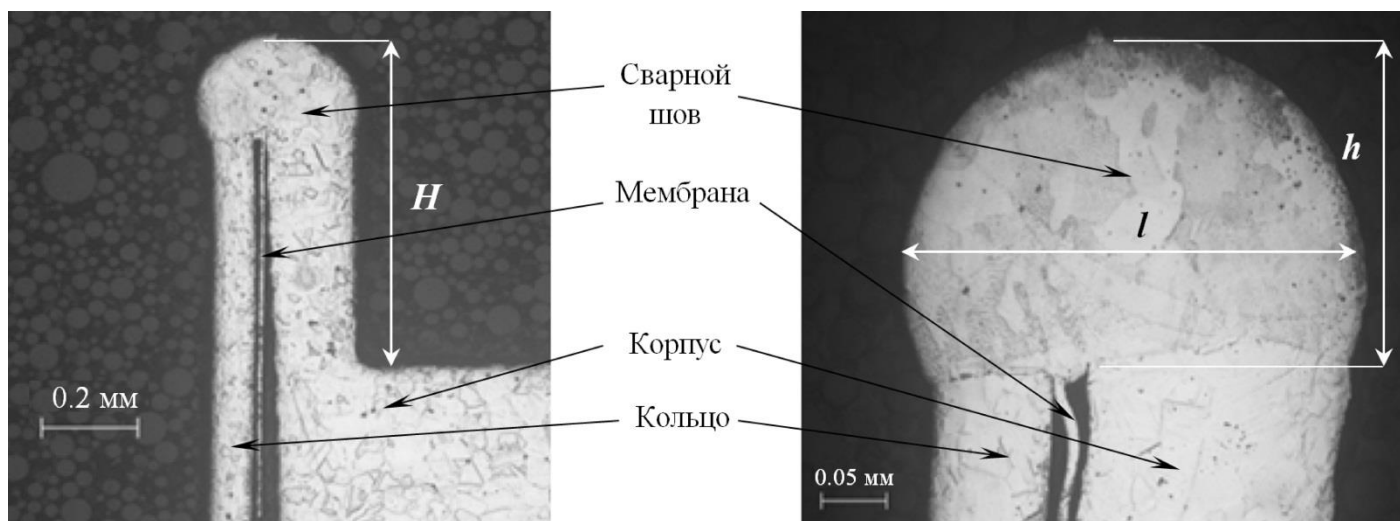


Рис. 4.

Защитный кожух

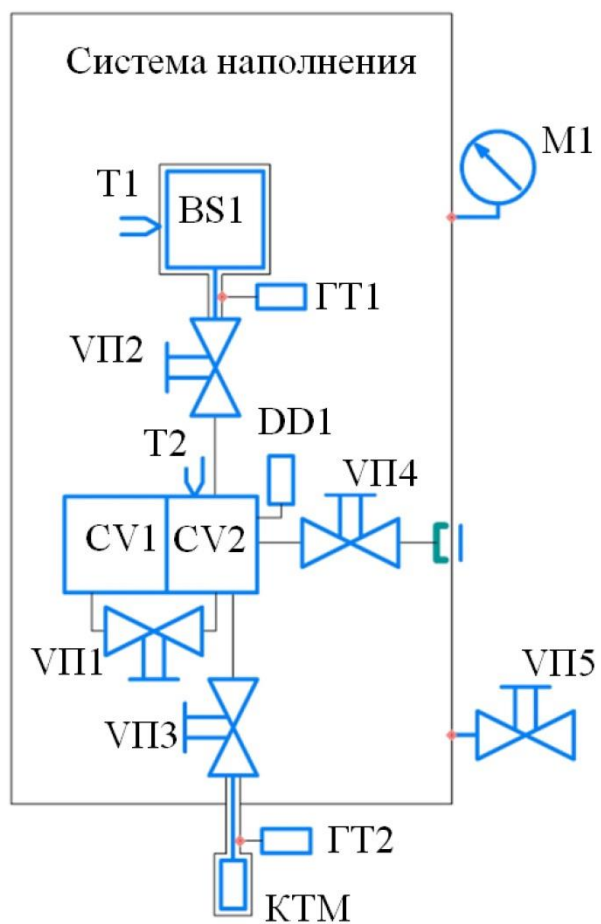


Рис. 5.

Место стыковки с криоголовкой

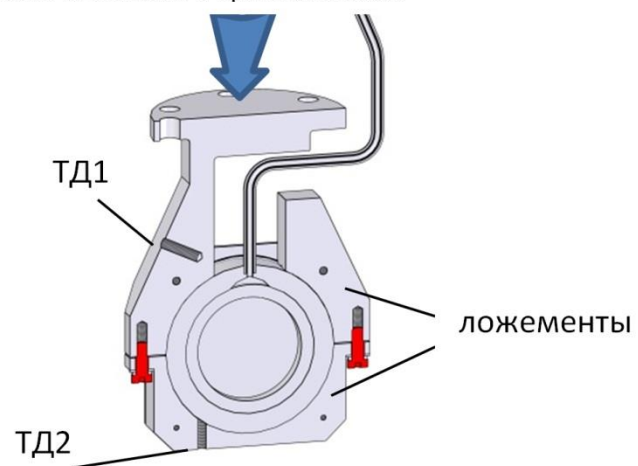


Рис. 6

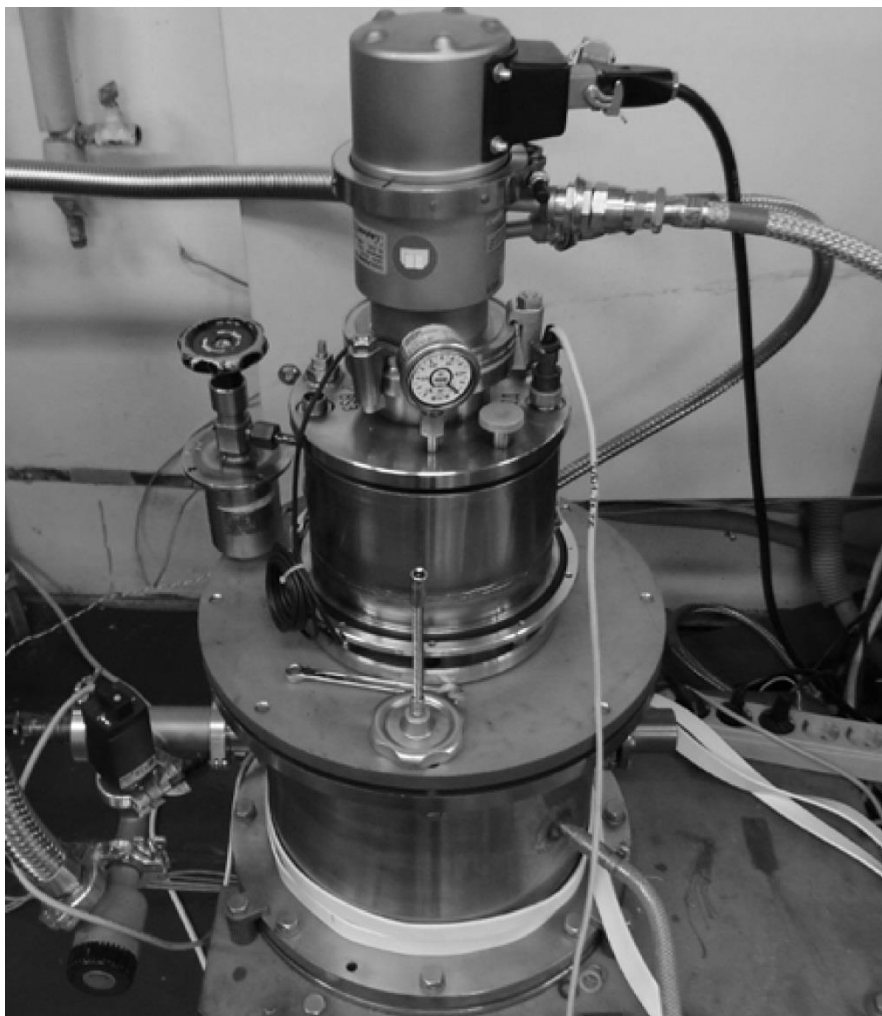


Рис. 7.

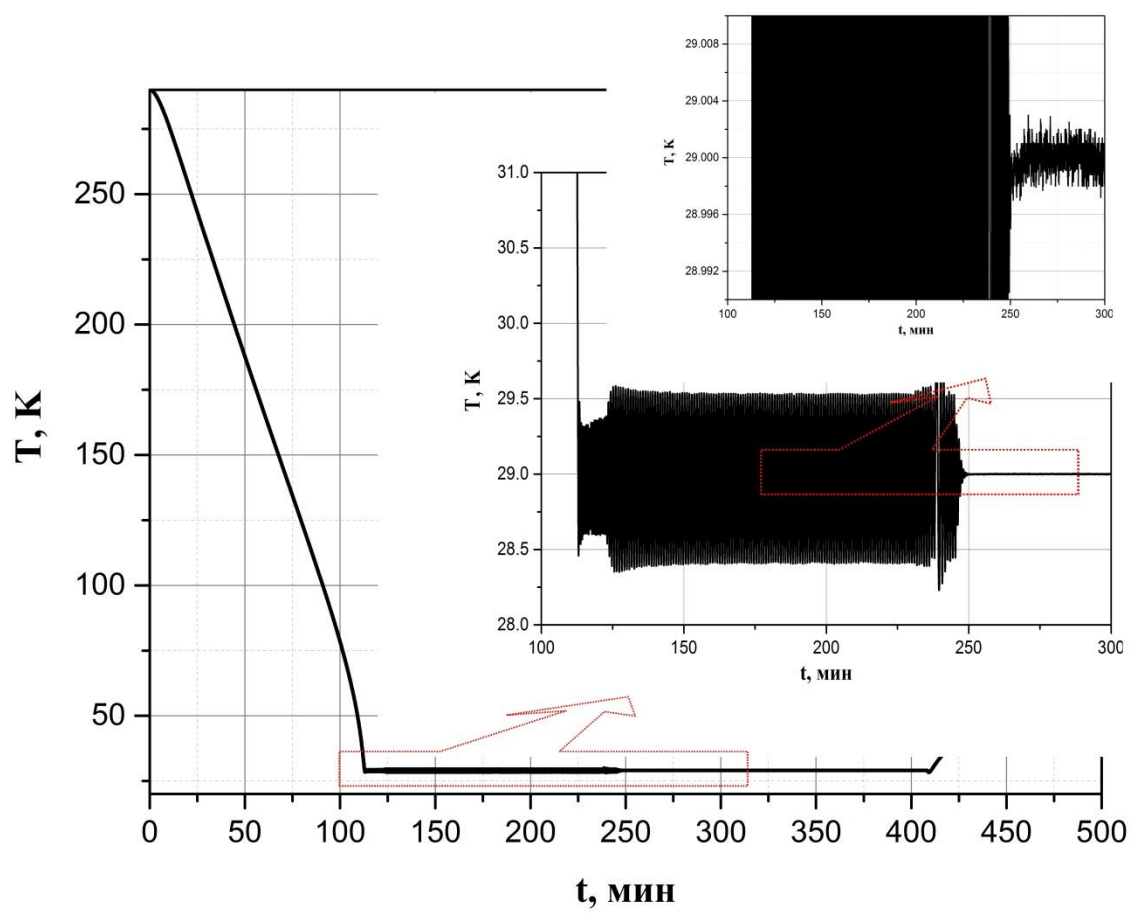


Рис. 8.

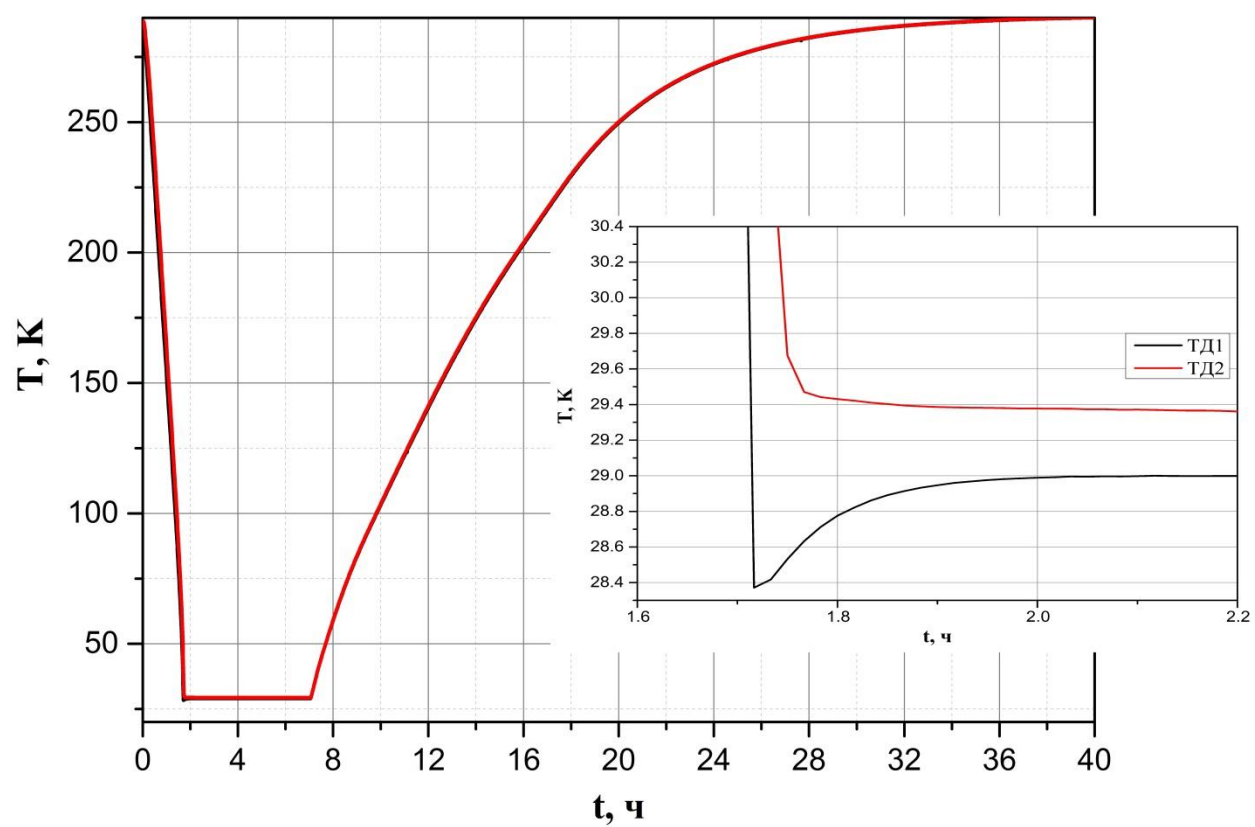
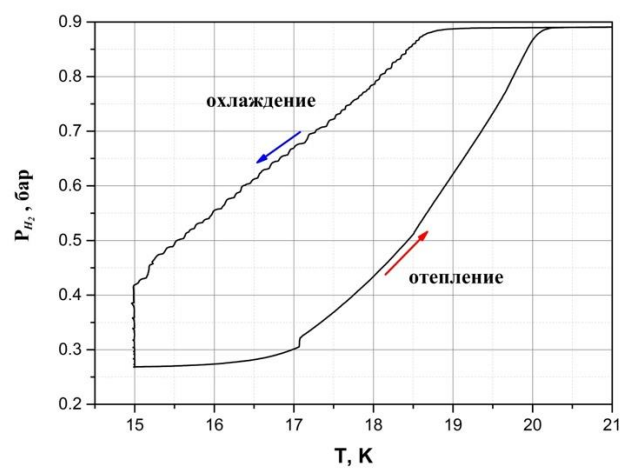
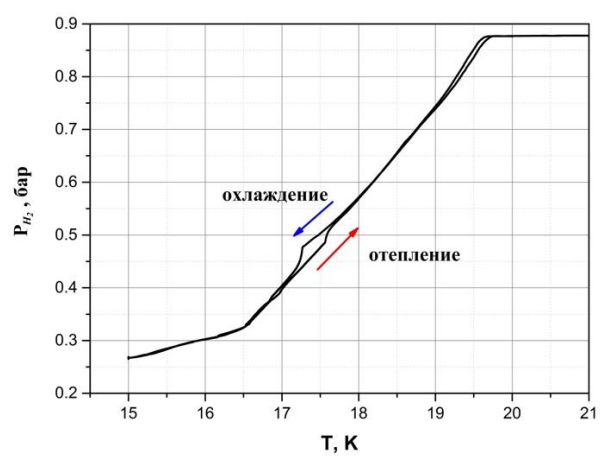


Рис. 9.

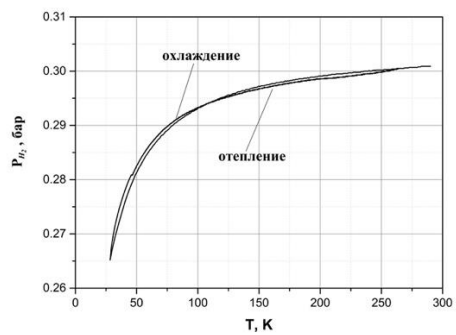


(а)

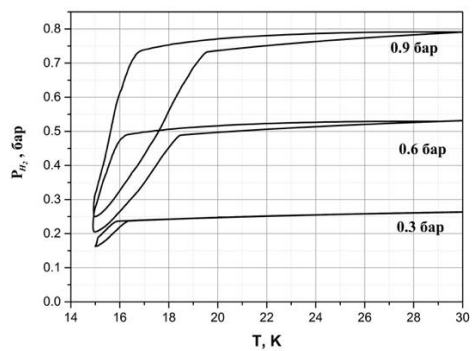


(б)

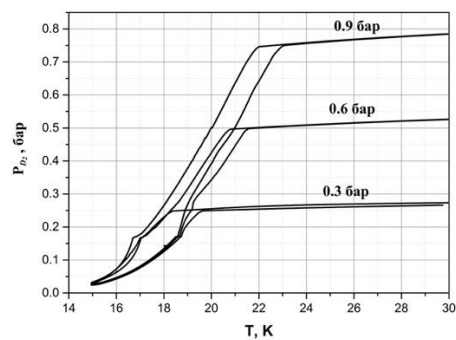
Рис. 10



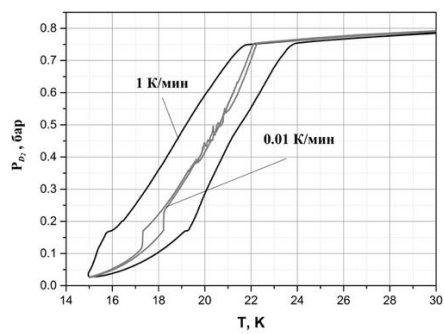
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 11

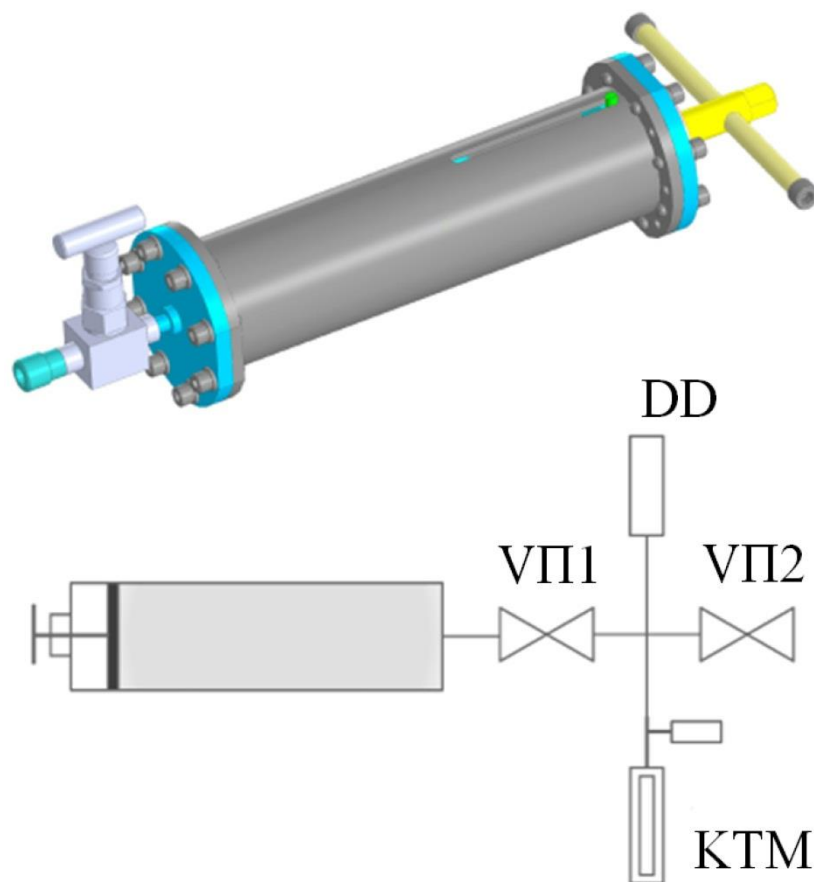


Рис. 12.

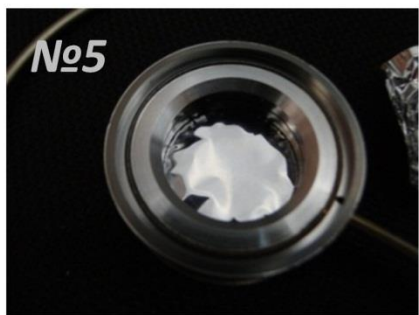


Рис. 13.

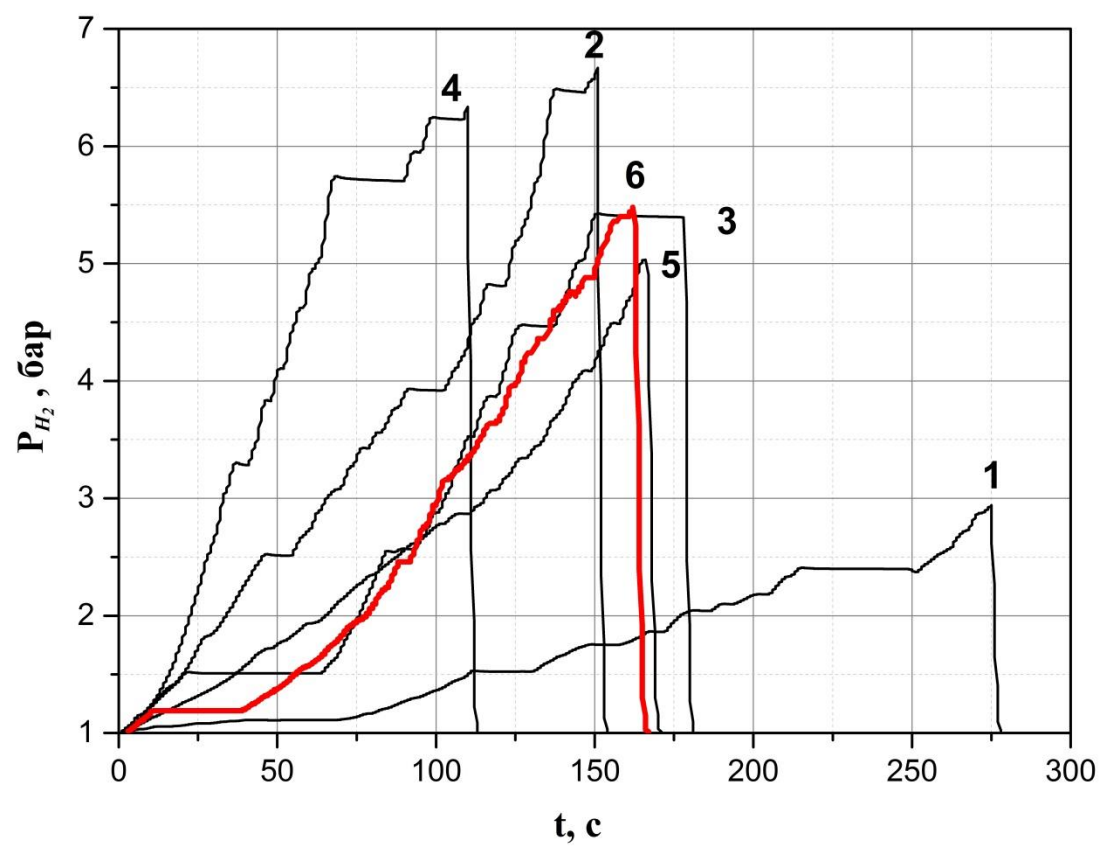


Рис. 14.



Рис. 15.