

ТЕХНОЛОГИЯ НАМОРАЖИВАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В. М. Изгородин, Е. Ю. Соломатина, Е. И. Осетров, М. А. Рогожина, А. П. Пепеляев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

Эксперименты по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) предполагают быстрое сжатие с помощью лазерного излучения сферических криогенных мишеней, до больших значений плотности и температуры, необходимых для эффективного термоядерного горения вещества. Криогенная мишень в общем виде представляет собой полую сферическую оболочку с гладким однородным слоем изотопов водорода (смесь дейтерия и трития), замороженным на ее внутренней поверхности. Начальным этапом разработки технологии получения криогенных мишеней является процедура наполнения полистирольной оболочки изотопами водорода методом низкотемпературной

перегонки через капилляр с последующим намораживанием на внутренней поверхности оболочки [1].

Стенд для исследования мишеней при низких температурах состоит из исследовательского криостата, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оборудования для измерения и контроля температуры, экспериментальных боксов и оптической системы визуального контроля. Схема газовакуумной системы стенда представлена на рис. 1.

Для проведения исследований используется оптический криостат с системой охлаждения на

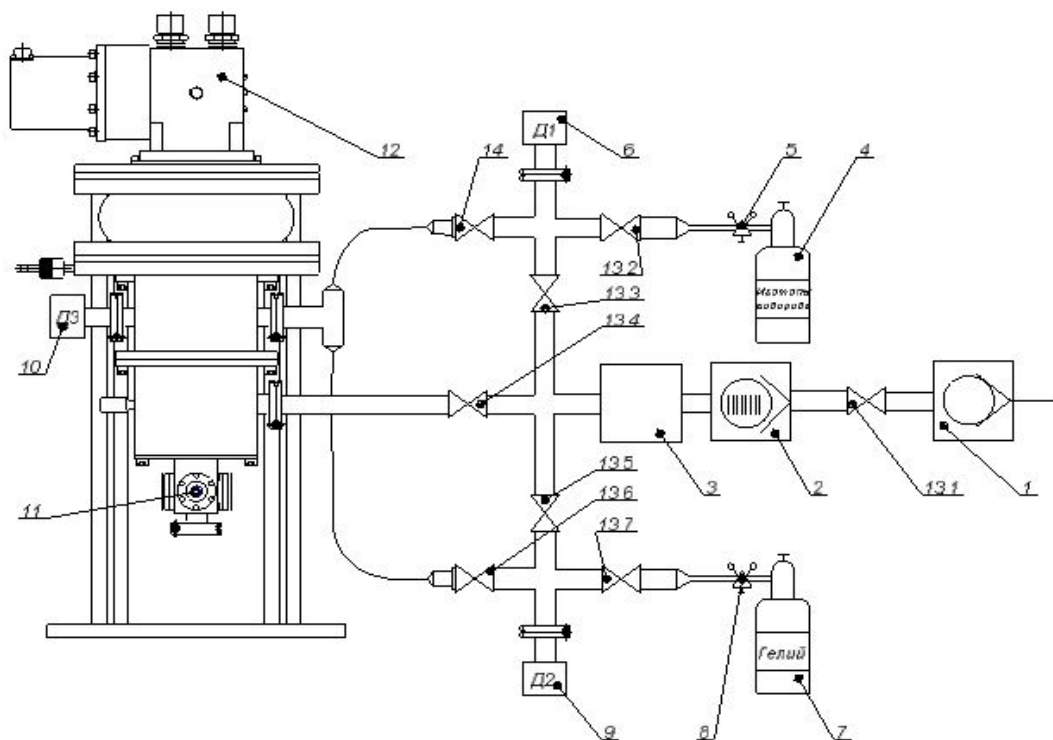


Рис. 1. Принципиальная схема газовакуумной системы стенда: 1 – форвакуумный насос; 2 – турбомолекулярный насос; 3 – буферный объем насоса; 4 – баллон с изотопами водорода; 5 – редуктор P1; 6 – датчик давления Д1; 7 – баллон с гелием; 8 – редуктор P2; 9 – датчик давления Д2; 10 – датчик давления Д3; 11 – бокс с полистирольной оболочкой; 12 – криостат; 13.1–13.7 – вакуумный клапан; 14 – натекатель

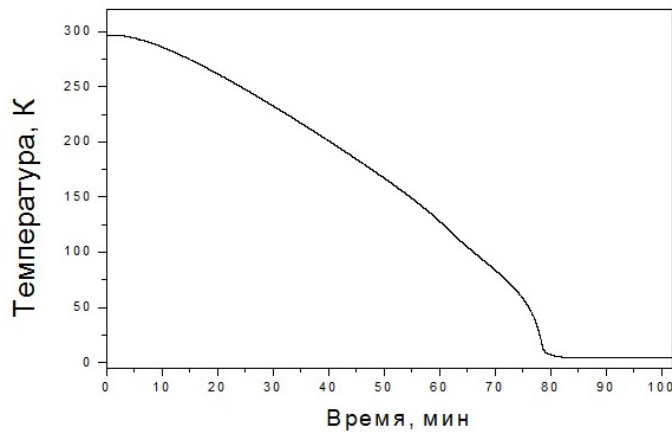


Рис. 2. Охлаждение рабочей площадки криостата

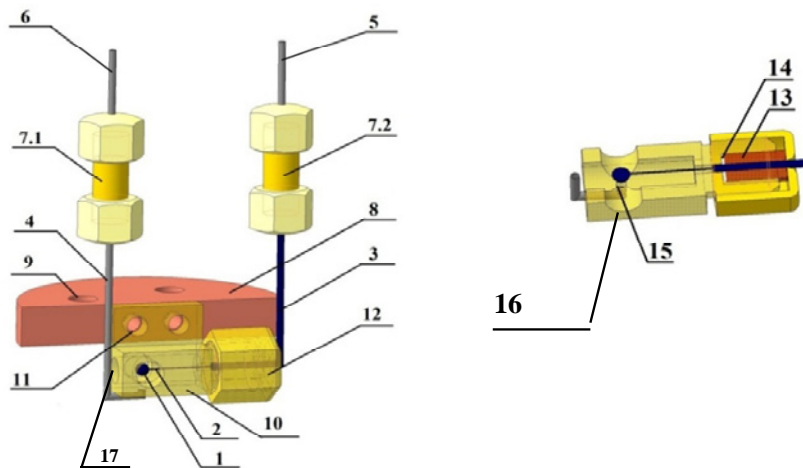


Рис. 3. Компоненты сборки бокса-кюветы (слева) и сборка в разрезе (справа): 1 – полистирольная оболочка диаметром 1–2 мм; 2 – капилляр \varnothing 60–100 мкм, стекло; 3 – капилляр подачи изотопов водорода \varnothing 1 мм, $L = 70$ мм, сталь; 4 – капилляр подачи теплообменного газа \varnothing 1 мм, $L = 70$ мм, сталь; 5 – капилляр подачи изотопов водорода основной \varnothing 1 мм, $L = 1000$ мм, сталь; 6 – капилляр подачи теплообменного газа основной \varnothing 1 мм, $L = 1000$ мм, сталь; 7.1–7.2 – муфта, герметично соединяющая выходы капилляров на линиях подачи рабочих газов, латунь; 8 – держатель сборки, медь; 9 – отверстия в держателе для крепления на столике 2-й ступени; 10 – кювета, медь; 11 – 2 отверстия для крепления бокса; 12 – накидная гайка, латунь; 13 – втулка, латунь; 14 – кольцо из индиевой проволоки; 15 – отверстие для ввода теплообменного газа; 16 – два отверстия для визуального наблюдения оболочки; 17 – вспомогательное отверстие для ввода сборного капилляра

основе двухступенчатого криорефрижератора замкнутого цикла, работающего по принципу пульсационной трубы с холодопроизводительностью 1 Ватт при 4,2 К. Основными элементами исследовательского криостата являются криорефрижератор, гелиевый компрессор, линии подачи гелия.

Криорефрижератор имеет две ступени охлаждения: до 45 К на первой ступени и до 4,2 К на второй. Необходимая температура для исследования процесса ожижения с последующим замораживанием изотопов водорода в сферической оболочке (от 10 К до 20 К) достигается на терморегу-

лируемом столике объектов, установленном на второй ступени.

Контроль температуры осуществляется с помощью двух датчиков. Датчик ДТ1 установлен в терморегулируемом столике на расстоянии 11 мм от центра оболочки (его показания обозначены T_A). Второй датчик ДТ2 установлен непосредственно на корпусе экспериментального бокса (T_B). Датчики работают в диапазоне температур от 1,4 К до 325 К с точностью $\pm 0,009$ К и $\pm 0,001$ К при $T = 20$ К соответственно. Показания датчиков регистрируются контроллером с шагом по времени 0,5 с и выводятся на ПК. Пример зависимости на рис. 2.

Для проведения экспериментов необходимо поддерживать длительное время заданную температуру в зоне объекта исследования. Эту функцию выполняет нагреватель, установленный на расстоянии 11 мм от центра оболочки. Управление осуществляется с контроллера (непосредственно с панели управления или удаленно с ПК), средний разброс значений при этом не превышает 0,002 К.

Полистирольная оболочка закреплена в боксе – контейнере, который установлен в рабочей зоне криостата, откачиваемой до высокого вакуума. В бокс напускается гелий, который выполняет функцию теплообменного газа для выравнивания температуры поверхности полистирольной оболочки. Оболочка в свою очередь наполняется изотопами водорода в газовой фазе до давлений порядка 10^5 Па. Основной задачей при сборке является обеспечение герметичности бокса и капилляров для напуска газов (гелий, изотопы водорода) с учетом их использования при криогенных температурах. При этом должна также обеспечиваться простота монтажа бокса и надежность его соединений, так как размер экспериментальных сборок составляет примерно $30 \times 20 \times 10$ мм³.

Были разработаны и реализованы несколько способов изготовления и сборки экспериментальных боксов. В настоящее время используется наиболее технологичный вариант – бокс-кювета, представленный на рис. 3.

В экспериментах по ожижению изотопов водорода с последующим замораживанием использовался протий (H_2), дейтерий (D_2), протий-дейтериевая смесь (H_2 -HD- D_2), генерируемая металлгидридным источником и молекулярная протий-дейтериевая смесь (H_2, D_2). Эксперименты проводились в экспериментальной сборке «бокс-кювета», параметры сборки: микросфера

Ø 1,325 мм, материал – полистирол, Ø стеклянного капилляра – 56 мкм. Этапы проведения экспериментов по намораживанию изотопов водорода:

1) Откачка рабочего объема криостата и систем напуска рабочих газов (гелий, изотопы водорода) с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов до 10^{-3} Па;

2) Охлаждение экспериментальной сборки до 30 К;

3) Напуск теплообменного газа гелия в полость бокса;

4) Напуск изотопов водорода в сферическую полистирольную оболочку;

5) Охлаждение оболочки до температуры тройной точки, дозирование количества жидкости в микросфере до необходимого уровня;

6) Небольшое понижение температуры (0,2–0,4 К) до образования «ледяной пробки» в капилляре, которая позволяет обеспечить фиксированный уровень жидкости в оболочке;

7) Понижение температуры с заданными параметрами скорости до полного преобразования жидкой фазы в твердую. Регистрация процесса и полученных результатов на фото, видео.

8) В зависимости от задачи – выдерживание твердого слоя при постоянной температуре заданное время или отогрев оболочки с обратным переходом твердого слоя в жидкую фазу. При отогреве необходимо не превысить температуру, полученную в п.6. В таком случае можно провести неограниченное количество циклов замораживания криогенного слоя при аналогичных условиях.

Процесс увеличения жидкой фазы в полистирольной оболочке в результате наполнения методом перегонки представлен на рисунке 4.

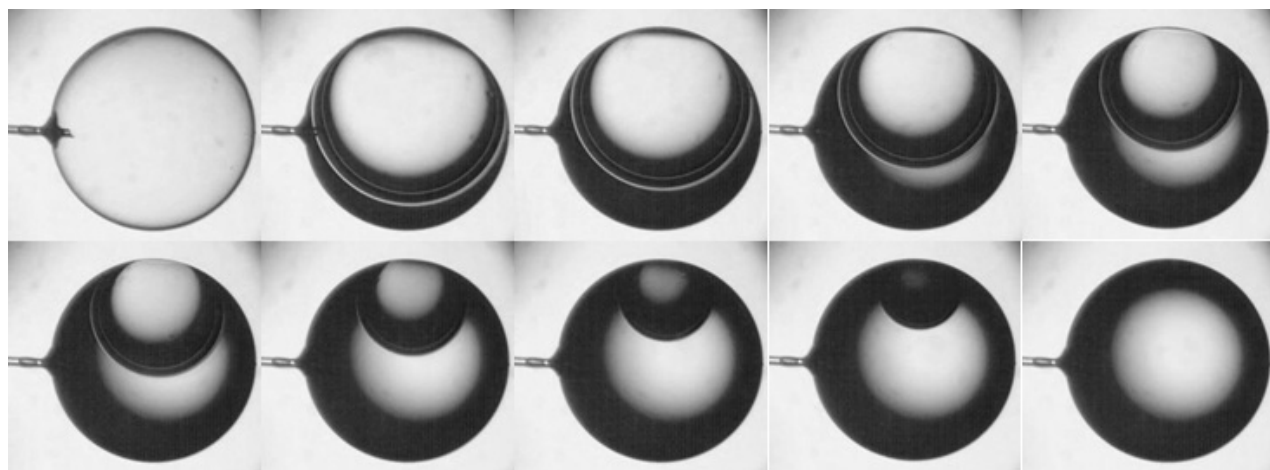
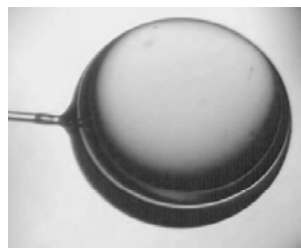
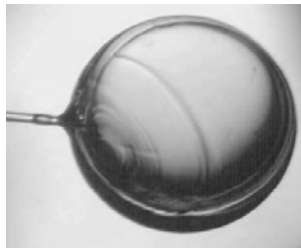


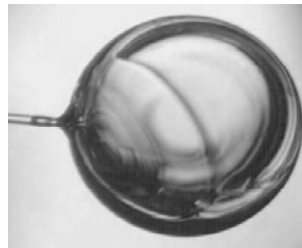
Рисунок 4. Процесс наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода в жидкой фазе



Начало конденсации
 $T_A = 13,9 \text{ К}, T_B = 14,7 \text{ К}$

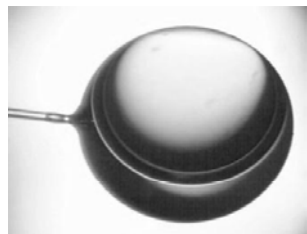


Начало кристаллизации
 $T_A = 13,8 \text{ К}, T_B = 14,6 \text{ К}$



Твердая фаза
 $T_A = 13,4 \text{ К}, T_B = 14,2 \text{ К}$

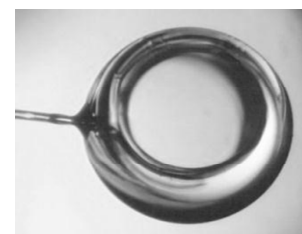
Рис. 5. Процесс замораживания протия в оболочке



Начало конденсации,
 $T_A = 18,6 \text{ К}, T_B = 19,4 \text{ К}$



Начало кристаллизации,
 $T_A = 18,47 \text{ К}, T_B = 19,27 \text{ К}$



Твердая фаза,
 $T_A = 18,37 \text{ К}, T_B = 19,17 \text{ К}$

Рис. 6. Процесс замораживания дейтерия в оболочке



Начало конденсации
 $T_A = 16,05 \text{ К}, T_B = 16,97 \text{ К}$



Начало кристаллизации
 $T_A = 15,81 \text{ К}, T_B = 16,74 \text{ К}$

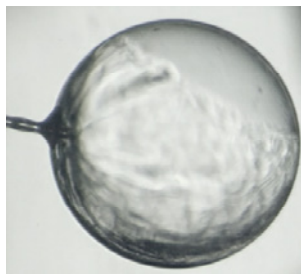


Твердая фаза
 $T_A = 15,7 \text{ К}, T_B = 16,6 \text{ К}$

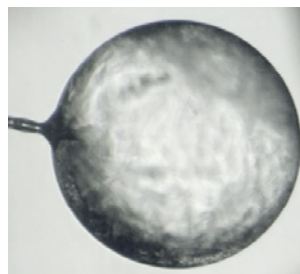
Рис. 7. Процесс замораживания протий-дейтериевой смеси $\text{H}_2\text{-HD- D}_2$



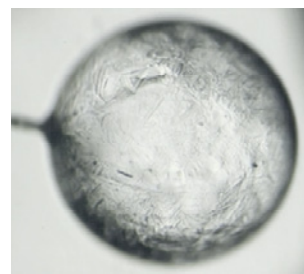
$T_A = 16,5 \text{ К}$
Начало конденсации



$T_A = 14,6 \text{ К}$
Начало кристаллизации,



$T_A = 14,5 \text{ К}$
Твердая фаз



$T_A = 14,5 \text{ К}$
Твердая фаза (Фокус на переднюю поверхность оболочки).

Рис. 8. Замораживание смеси $\text{H}_2\text{-D}_2$ в оболочке

Динамика поведения криогенного слоя протия и дейтерия при различных значениях температуры около тройной точки показана на рисунках 5 и 6 соответственно.

Результаты экспериментов по намораживанию протий-дейтериевой смеси, генерируемой металлгидридным источником, представлены на рисунке 7.

На рисунке 8 представлена молекулярная смесь протия и дейтерия в твердой фазе при температуре 14.5 К. Характерной особенностью процесса замораживания такой смеси является разброс температуры начала кристаллизации (от 14 до 15 К). Это связано, скорее всего, с постоянным перемешиванием протия и дейтерия в оболочке с капилляром во время циклов «замораживание-отогрев» и, как следствие, постоянным изменением их процентного соотношения. Из-за этого про-

цесс кристаллизации может начинаться каждый раз при различной температуре.

Список литературы:

1. Изгородин В. М., Соломатина Е. Ю., Пепеляев А. П., Рогожина М. А., Осетров Е. И. Технология наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода методом перегонки через капилляр с последующим замораживанием // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'15 Junior. Сборник тезисов докладов 10 Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. 28 июня – 4 июля 2015 г., г. Москва. НИЦ «Курчатовский институт», 2015., с. 150–151.