

ТЕХНОЛОГИЯ НАПОЛНЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА МЕТОДОМ ПЕРЕГОНКИ ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯР С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ

*М. А. Кайгородова, В. М. Изгородин, Е. Ю. Соломатина,
А. П. Пенеляев, Е. И. Осетров*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.
kaygorodova.m@gmail.ru

Описан процесс наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода методом перегонки через капилляр для создания криогенной мишени. Приведена схема стенда для исследований и методика проведения экспериментов. Показаны результаты наполнения оболочки с последующим замораживанием для протия, дейтерия и протий-дейтериевой смеси.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается лазерная установка мегаджоульного уровня энергии для проведения экспериментов по инерциальному термоядерному синтезу. Идея управляемого термоядерного синтеза основана на возможности симметричного сжатия и нагрева до термоядерных температур малых объемов топливного вещества, заключенного в мишени, за доли наносекунд. Топливная мишень в простейшем виде представляет собой полимерную сферическую оболочку с криогенным слоем DT-топлива заданной толщины, сформированным на ее внутренней поверхности. Разработка технологии производства криогенных мишеней включает в себя несколько этапов, одним из которых является разработка процедуры наполнения сферической оболочки изотопами водорода методом перегонки через капилляр [1].

Стенд для исследований

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.

1) Исследовательский криостат.

Для проведения исследований используется оптический криостат с системой охлаждения на основе двухступенчатого криорефрижератора замкнутого цикла на основе пульсационной трубы с холодопроизводительностью 1 Ватт

при 4.2 К. Основными элементами исследовательского криостата являются криорефрижератор, гелиевый компрессор, линии подачи гелия [2].

Криорефрижератор имеет две ступени охлаждения: до 45 К на первой ступени и до 4.2 К на второй. Необходимая температура для исследования процесса ожидения с последующим замораживанием изотопов водорода в сферической оболочке (от 10 до 20 К) достигается на терморегулируемом столике объектов, установленном на второй ступени.

2) Система одновременной откачки рабочего объема криостата и газовых магистралей, системы напуска гелия и изотопов водорода.

Была разработана и смонтирована система одновременной откачки рабочего объема криостата и газовых магистралей, с последующим напуском рабочих газов в бокс и полистирольную оболочку [3, 4]. Принципиальная схема системы показана на рис. 1.

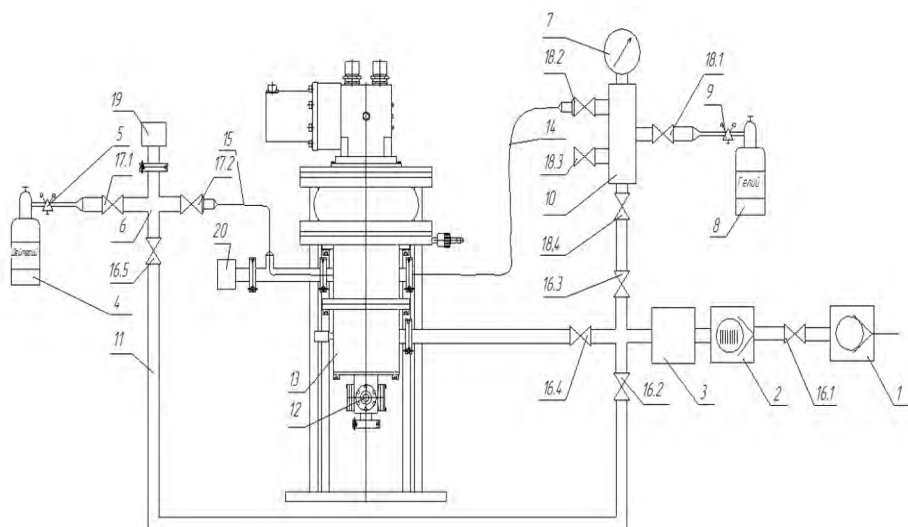


Рис. 1. Принципиальная схема стенда: 1 – Форвакуумный насос; 2 – Турбомолекулярный насос; 3 – Буферный объем насоса; 4 – Баллон с изотопами водорода; 5 – Редуктор P1; 6 – Распределитель на линии напуска изотопов водорода; 7 – Мановакууметр; 8 – Баллон с гелием; 9 – Редуктор P2; 10 – Распределитель на линии напуска гелия; 11 – Металлорукав; 12 – Бокс с полистирольной оболочкой; 13 – Криостат; 14 – Капилляр на линии напуска гелия; 15 – Капилляр на линии напуска изотопов водорода; 16.1–16.5 – Вакуумный клапан; 17.1–17.2 – Натекатель; 18.1–18.4 – Вентиль; 19 – Датчик давления Д1; 20 – Датчик давления Д2

Откачка системы производится с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов в три стадии: после откачки буферного объема откачиваются магистрали подачи изотопов водорода, магистрали подачи теплообменного газа (гелий) и рабочего объема криостата, соответственно. Данная схема откачки позволяет достигать необходимого вакуума при минимальном количестве используемого насосного оборудования для вакуумирования трех изолированных друг от друга систем. Кроме того, система откачки объединена с системами газонапуска гелия и изотопов водорода, что позволяет при пере-

крытии определенных вентилях производить напуск соответствующих газов в экспериментальный бокс и полистирольную оболочку.

3) Контроль температуры.

Контроль температуры экспериментальных сборок осуществляется с помощью двух датчиков. Датчик ДТ1 установлен в 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 до 325К 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.

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.

4) Экспериментальный бокс.

Экспериментальный бокс условно представляет собой систему изолированных газовых объемов с различным давлением (рис. 2). Полистирольная оболочка закреплена в боксе – контейнере, который установлен в рабочую зону криостата, откачиваемую 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 1 бар. Основной задачей при сборке является обеспечение герметичности бокса и капилляров для напуска рабочих газов (гелий, изотопы водорода) с учетом их использования при криогенных температурах [5]. При этом должна также обеспечиваться простота монтажа бокса и надежность его соединений, так как размер экспериментальныхборок составляет примерно $30 \times 20 \times 10$ мм.

Были разработаны и реализованы несколько способов изготовления и сборки экспериментальных боксов. В настоящее время используется наиболее технологичный вариант в виде бокса-кюветы, который представлен на рис. 3.

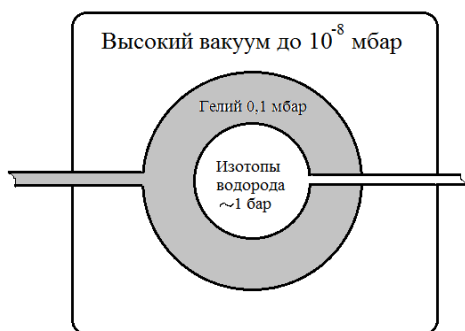


Рис. 2. Схематичное изображение бокса

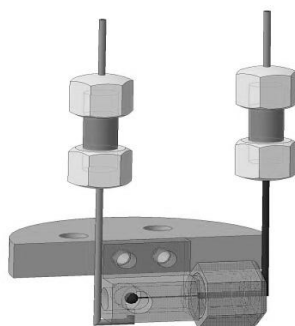


Рис. 3. Экспериментальный бокс-кювета

5) Система визуального контроля.

Для получения качественного изображения, позволяющего наблюдать четкий контур полистирольной оболочки и, в последующем, границы жидких и замороженных изотопов водорода, используется микроскоп с диодной подсветкой (числовая апертура 0.11, рабочее расстояние 90 мм). Изображение регистрируется камерой и передается на ПК.

Методика проведения экспериментов

Этапы проведения эксперимента по напуску изотопов водорода методом перегонки через капилляр в сферическую полистирольную оболочку с последующим замораживанием:

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

2) Процедура охлаждения 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 ниже тройной точки с записью процесса фазовых переходов «газ-жидкость-твердое тело» на видео.

В экспериментах по ожижению изотопов водорода с последующим замораживанием использовался протий (H_2), дейтерий (D_2) и протий-дейтериевая смесь (HD) [6]. Наполнение газом происходит в уже установленную в криостат полистирольную оболочку, закрепленную в медном боксе. Показания температуры записываются с помощью датчика, размещенного на поверхности бокса. Перед напуском рабочих газов осуществляется выход на заданную температуру ($T = 30$ К) и ее поддержание с помощью контроллера. Затем происходит подача теплообменного газа в бокс и изотопов водорода в оболочку. Далее следует постепенное понижение температуры (на 1 К за 3–4 мин), задаваемое через программу контроллера, до начала процесса ожижения в оболочке. Процесс увеличения жидкой фазы в полистирольной оболочке в результате наполнения методом перегонки представлен на рис. 4.

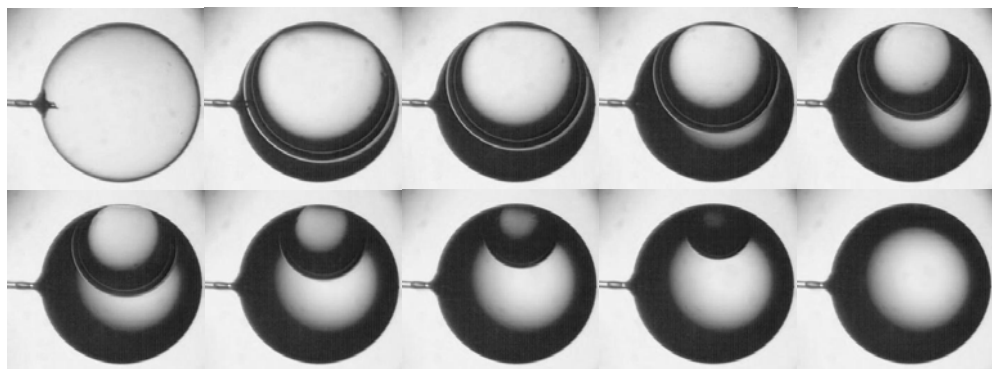


Рис. 4. Процесс наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода в жидкой фазе

Результаты экспериментов

Динамика поведения криогенного слоя из водорода при различных значениях температуры около тройной точки показана на рис. 5.1–5.3 (протий), 6.1–6.3 (дейтерий), 7.1–7.3 (протий-дейтериевая смесь). Эксперименты проводились в экспериментальной сборке «бокс-кювета», параметры сборки: микросфера \varnothing 1,325 мм, материал – полистирол, \varnothing стеклянного капилляра – 56 мкм.

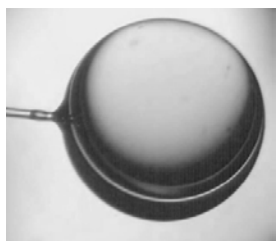


Рис. 5.1. Начало конденсации $T_A = 13,9$ К,
 $T_B = 14,7$ К

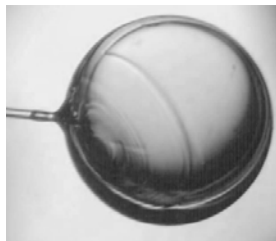


Рис. 5.2. Начало кристаллизации $T_A = 13,8$ К,
 $T_B = 1,6$ К



Рис. 5.3. Твердая фаза
 $T_A = 13,4$ К, $T_B = 14,2$ К

На рис. 5.1 представлен процесс ожижения протия в микросфере, газ сконденсировался при $T_B = 14,7$ К, что соответствует давлению насыщенного пара в оболочке $P = 0,1042$ атм (температура тройной точки протия 13,96 К). По предварительным оценкам, масса сконденсированного газа составляет $m_{H_2} = 0,07$ мг. При температуре $T_B = 14,6$ К наблюдаем переход жидкой фазы в твердую (рис. 5.2), который полностью завершился при $T_B = 14,2$ К (рис. 5.3).

Эксперимент с дейтерием проводился по тому же алгоритму. Температура тройной точки дейтерия выше, чем у протия и составляет 18,7 К, соответственно процесс ожижения дейтерия начался при более высокой температуре $T_B = 19,4$ К, $P_{\text{нас.п.}} = 0,231$ атм (рис. 6.1). Масса сконденсированного газа, полученная расчетным путем, составляет $m_{D_2} = 0,168$ мг. С понижением температуры до $T_B = 19,27$ К начался процесс намораживания дейтерия на внутренней поверхности оболочки, который завершился при $T_B = 19,17$ К (рис. 6.2, 6.3).

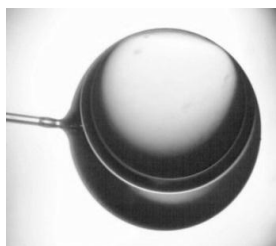


Рис. 6.1. Начало конденсации $T_A = 18,6$ К,
 $T_B = 19,4$ К

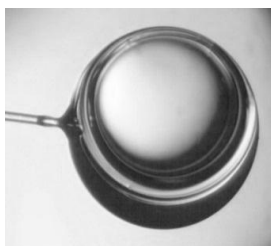


Рис. 6.2. Начало кристаллизации $T_A = 18,47$ К,
 $T_B = 19,27$ К



Рис. 6.3. Твердая фаза
 $T_A = 18,37$ К, $T_B = 19,17$ К

В серии проведенных экспериментов были замечены различия в поведении протия и дейтерия – намораживание тяжелого изотопа водорода происходило по всей поверхности сферы, в то время как в случае с протием относительно большее количество льда образовывалось в нижней части микросферы. Было обнаружено, что в условиях эксперимента равномерность распределения дейтерия в тройной точке между верхним и нижним полюсом сферической оболочки значительно выше. Это связано, вероятно, с большей, чем у протия вязкостью, большей величиной коэффициента поверхностного натяжения в районе тройной точки ($\sigma_{D_2}(18,5K) = 4,006 \cdot 10^{-3} \frac{Н}{м}$, $\sigma_{H_2}(13,95 K) = 3,004 \cdot 10^{-3} \frac{Н}{м}$).

Температура тройной точки протий-дейтериевой смеси составляет 16,6 К, соответственно фазовые превращения происходили в районе этой температуры. На рис. 7.1 показано начало конденсации при $T_B = 16,97 K$, с понижением температуры до 16,74 К начался процесс кристаллизации и при $T_B = 16,6 K$ вся жидкость перешла в твердую фазу (рис. 7.2, 7.3). Расчетная масса сконденсированной смеси составляет $m_{HD} = 0,025$ мг.



Рис. 7.1. Начало конденсации $T_A = 16,05$,
 $T_B = 16,97 K$

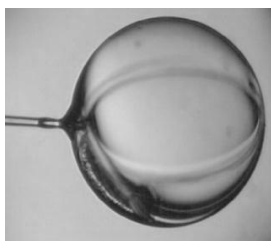


Рис. 7.2. Начало кристаллизации $T_A = 15,81 K$,
 $T_B = 16,74 K$

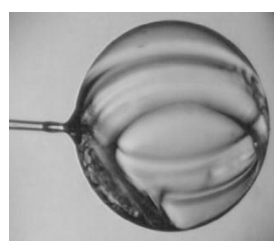


Рис. 7.3. Твердая фаза $T_A = 15,7 K$, $T_B = 16,6 K$

Заключение

Была разработана технология наполнения сферической полистирольной оболочки изотопами водорода методом перегонки через капилляр.

Проведены эксперименты по ожижению протия, дейтерия и протий-дейтериевой смеси с последующим намораживанием на внутренней поверхности оболочки. Отработана техника проведения эксперимента.

Данная работа является начальным этапом разработки технологии получения криогенных мишеней с гладким однородным слоем твердого топлива заданной толщины для проведения экспериментов по лазерному термоядерному синтезу.

Список литературы

1. Cryogenic Targets: Current Status and Future Development. LLEReview, Volume 114.

2. Скотт Р. Б. Техника низких температур. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
3. Пипко А. И., Плисовский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем, М.: Энергия, 1970.
4. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. М.: Госэнергоиздат, 1960.
5. Солнцев Ю. П., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982.
6. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. / Под ред. Гамбурга Д. Ю., Дубовкина Н. Ф. М.: Химия, 1989.

TECHNOLOGY OF FILLING SPHERICAL POLYSTYRENE CAPSULE ISOTOPES OF HYDROGEN THE DISTILLATION METHOD THROUGH THE FILL TUBE WITH THE SUBSEQUENT FREEZING

*M. A. Kaigorodova, V. M. Izgorodin, E. Y. Solomatina,
A. P. Pepelyaev, E. I. Osetrov*

The ¹RFNC-All-Russian Scientific Research Institute
of Experimental Physics, Sarov.
kaygorodova.m@gmail.ru

The conducting of experiments on laser thermonuclear fusion assumes the use of the cryogenic target representing a hollow capsule with smooth uniform by a layer of isotopes of hydrogen, freezing on its inner surface.

The initial stage of development of technology of reception of cryogenic targets is filling procedure of polystyrene capsule isotopes of hydrogen by distillation method through a fill tube.

For development of technology of filling following works have been done:

1. development and installation of the test bench for research of targets at low temperatures;

2. development and installation of the system of simultaneous pumping out of cryostat working volume and gas highways, the system of letting of helium and hydrogen isotopes;

3. development and assemblage of experimental boxes in which the capsule settles down during experiment;

4. the organisation of control of temperature and visual control of experimental assemblage;

5. making of estimated calculations of quantity of filled gas, occurrence of a gradient of temperatures on experimental assemblage.

Experiments on liquefaction protium, deuterium and protium-deuterium mixtures with the subsequent freezing on an inner surface of a capsule are made. The technics of conducting the experiment is fulfilled.